

DLR-IB-FA-BS-2020-116

**Faserverbundleichtbau für
Schienenfahrzeuge**

Beiträge zum Projekt faWaSiS

Interner Bericht

Jörg Nickel



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

DLR-IB-FA-BS-2020-116

Faserverbundleichtbau für Schienenfahrzeuge

Beiträge zum Projekt faWaSiS

Zugänglichkeit:

Stufe 1 Allgemein zugänglich: Der Interne Bericht wird elektronisch ohne Einschränkungen in ELIB abgelegt. Falls vorhanden, ist je ein gedrucktes Exemplar an die zuständige Standortbibliothek und an das zentrale Archiv abzugeben.

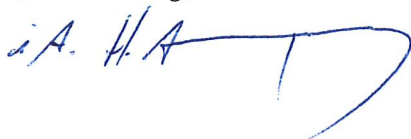
Braunschweig, September 2020

Der Bericht umfasst: 56 Seiten

Stellvertretender Abteilungsleiter:

Autor:

(Heiko Assing)



(Jörg Nickel)



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Dokumenteigenschaften

Titel	Faserverbundleichtbau für Schienenfahrzeuge - Beiträge zum Projekt faWaSiS
Betreff	Analyse von Leichtbaumaßnahmen mit Faserkunststoffverbunden für eine Dachstruktur im Projekt faWaSiS
Institut	Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (FA) Abteilung Funktionsleichtbau (FA-FLB)
Erstellt von	Dipl.-Ing. Jörg Nickel
Beteiligte	Dipl.-Ing. Tobias Bach Dipl.-Ing. Martin Friedrich Dr.-Ing. Hardy Köke Dipl.-Ing. Johannes Wolff
Geprüft von	Dipl.-Ing. Heiko Assing
Freigabe von	Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne
Datum	15. September 2020
Version	1.0
Dateipfad	P:\06_Berichte\DLR-IB-FA-BS-2020-116_V1.0.docx

Inhaltsverzeichnis

Dokumenteigenschaften	2
1. Einleitung.....	5
2. Konzeptentwicklung.....	7
2.1. Gewicht und Kosten für ein ICx-Dach aus Faserkunststoffverbund	7
2.2. Schienenfahrzeugbauteilauswahl für Gewichts- und Kosten-Analyse.....	9
2.2.1. Auslegungskriterium	12
2.2.2. Randbedingungen und Zusatzfunktionen	12
2.2.3. Variationsparameter	13
2.2.4. Vorgehen bei der Berechnung	13
2.3. Grundlegendes Bauweisenkonzept	13
2.4. Leistungsklasse.....	15
3. Einführung in die numerische Optimierung	17
3.1. Optimierungsalgorithmus	18
3.2. Optimierungsmodell.....	18
3.3. Strukturmodell.....	19
3.4. Beispiel einer Strukturoptimierung mit Python/Ansys	19
4. Berechnung.....	24
4.1. Vor- und Aufbereitung der Lasten und Randbedingungen	24
4.2. Kraft-Angriffsbereich.....	25
4.3. Materialdaten	27
4.4. Aufbau des FE Modells	28
4.5. Ablauf der Optimierungsrechnung.....	30
4.6. Optimierungsparameter	31
4.7. Allgemeine Randbedingungen	32
4.8. Festigkeitsnebenbedingungen	33
4.9. Steifigkeitsnebenbedingungen.....	33
4.10. Resultate der Optimierungsrechnung	34
4.10.1.Resultate: Details Dachprofil	34
4.10.2.Resultate: Details Fußprofil	35
4.10.3.Resultate: Nebenbedingungen	35
4.10.4.Gesamtresultat: Bauteilgewicht aus Optimierung.....	37
5. Ergebnisse.....	38
5.1. Ergebnis: Details Dachprofil	38
5.2. Ergebnis: Äußere Decklage	39
5.3. Ergebnis: Innere Decklage	40

5.4. Ergebnis: Details Fußprofil	40
5.5. Gesamtergebnis: Bauteilgewicht	41
5.6. Diskussion der Ergebnisse	42
5.6.1. Vergleich der Gewichte von Metall- und FKV-Bauweise	42
5.6.2. Einordnung und Perspektive des erschlossenen Leichtbau-Potentials	42
5.7. FKV-Kostenanalyse	46
6. Verwertungsperspektive für das Projekt faWaSiS	47
7. Zusammenfassung	52
Abbildungsverzeichnis	53
Tabellenverzeichnis	54
Literaturverzeichnis	54
Abkürzungsverzeichnis	55

1. Einleitung

Der hier vorliegende Bericht betrachtet Leichtbaumaßnahmen mit Faserkunststoffverbunden (FKV) für Schienenfahrzeuge für das vom BMWi geförderte Projekt faWaSiS (*Signifikante Masseeinsparung durch strukturell tragende faserverbundintensive Wagenkastenstrukturen von Schienenfahrzeugen mit integriertem Schadensdiagnosesystem*) (faWaSiS, 2017). Es geht vor allem darum, Gewichtseinsparmöglichkeiten aufzuzeigen und die damit verbundenen Kosten zu ermitteln, um eine umfassende Bewertung zu ermöglichen und darauf basierend Empfehlungen für FKV-Strukturen in Schienenfahrzeugen zu geben.

Als konkretes Beispiel dient die Dachstruktur eines Wagenkastens für den ICx. Verglichen werden zwei alternative Bauweisen. Referenz ist die aktuell produzierte differenzielle Stahl-Schweißkonstruktion. Dem gegenüber steht eine Faserkunststoffverbund-Sandwichstruktur. Der gegebene Zeit- und Kostenrahmen erlaubt an dieser Stelle nur eine theoretische Analyse.

Ein Schwerpunkt liegt darauf, die Entwicklung der FKV-Bauweise für die Dachstruktur (Kapitel 2) sowie eine Einführung in die numerische Optimierung (Kapitel 3) und den Prozess der Gewichtsoptimierung (Kapitel 4) ausführlich darzustellen und die Resultate (Kapitel 5) zu bewerten. Aus den Erfahrungen und Ergebnissen lassen sich am Ende Empfehlungen (Kapitel 6) für die Konzeption, Gestaltung und Optimierung zukünftiger FKV-Leichtbaustrukturen für Schienenfahrzeuge ableiten. Diese Hinweise können einen hilfreichen Beitrag für weiterführende Projekte leisten. Die Betrachtungen schließen mit einer Zusammenfassung (Kapitel 7).

Der hier vorliegende Bericht stützt sich auf die 2016 publizierte Projektstudie „Einsatz von CFK-Leichtbau-Faserverbund-Technologien im Schienenfahrzeugbau“ (Nickel, 2016). Verschärfte Umweltaanforderungen sowie gestiegene Sicherheits- und Komfortanforderungen bedeuten meist zusätzliches Gewicht. Zulässige Achslasten setzen diesem Zuwachs enge Grenzen. Für diesen Konflikt ist Leichtbau oftmals die einzige Lösung. Besonders vielversprechend erscheinen Faserkunststoffverbunde. Dabei ist eine realistische Beurteilung von Chancen, Risiken und Kosten entscheidend für einen wirtschaftlichen Einsatz. Daraus erwächst die Motivation für die vom damaligen CFK Valley e. V. in Stade beauftragte und vom DLR durchgeführte Projektstudie, an der sich die Deutsche Bahn AG sowie die führenden Schienenfahrzeughersteller in Deutschland beteiligt haben.

Um die Chancen, Risiken und Kosten für den FKV-Einsatz umfassend ermitteln zu können, setzt sich die genannte Projektstudie (Nickel, 2016) zunächst detailliert mit den Leichtbaubegriff auseinander und analysiert anschließend den Stand der Technik bei FKV-Leichtbauteilen im Schienenfahrzeugbau. Eine eigens durchgeführte Befragung fokussiert die Zielrichtung der Studie mit einem aktuellen Meinungs- und Stimmungsbild zum FKV-Einsatz in Schienenfahrzeugen. Im Zentrum steht die detaillierte Gewichts- und Kostenanalyse an einem konkreten Beispielbauteil.

Wie das Ergebnis zeigt, ist es möglich, das Gewicht eines ICx-Mittelwagen-Dachsegments in FKV-Bauweise signifikant zu reduzieren bei lediglich moderaten Mehrkosten gegenüber der metallischen Referenzstruktur.

Neben der Aufgabe, die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse bei der Gewichts- und Kostenanalyse zusammenfassend darzustellen, verfolgt der hier vorliegende Bericht die Ziele:

- Beiträge zum Projekt „faWaSiS“ (*Signifikante Masseinsparung durch strukturell tragende faserverbundintensive Wagenkastenstrukturen von Schienenfahrzeugen mit integriertem Schadensdiagnosesystem*)
 - Input für die Bauweisenentwicklung und Konzeptbewertung von faserverbundintensiven Leichtbau-Dachstrukturen auf Basis der Projektstudie „Einsatz von CFK-Leichtbau-Faserverbund-Technologien im Schienenfahrzeugbau“
 - Darstellung der Rahmenbedingungen und Erkenntnisse aus obiger Studie
 - Beratung bei der Bewertung von Konstruktionslösungen
- Darstellung der Schritte bei der Entwicklung der FKV-Bauweise für das Dachsegment sowie der Berechnung und der numerischen Optimierung
- Empfehlungen für Gestaltung, Konstruktion und Bau von Leichtbaustrukturen in Schienenfahrzeugen am Beispiel eines Wagenkastendaches
- Methodik für die Bewertung von Leichtbaumaßnahmen

2. Konzeptentwicklung

Hohe gewichtsbezogene Festigkeit und Steifigkeit in Faserrichtung sind wesentliche Merkmale endlosfaserverstärkter Kunststoffe. Das macht sie zu hervorragenden Leichtbauwerkstoffen. So haben sie sich ausgehend von Luft- und Raumfahrtanwendungen in weiteren Branchen etabliert und gewinnen auch in der Verkehrstechnik zunehmend an Bedeutung.

Dabei sind serientaugliche und kosteneffiziente Fertigungsprozesse wesentliche Randbedingungen für den Markterfolg. Insgesamt eröffnen sich mit bedarfsgerechten Fasermaterialien, Halbzeugen und Matrixharzen Perspektiven für bisher so nicht erreichte Gewichtsreduktionen.

Wie stellt sich die Situation im Schienenfahrzeugbau heute konkret dar? Welche Potenziale gibt es insbesondere für Strukturbauteile aus Faserkunststoffverbunden? Mit welchen Konzepten und zu welchen Kosten lassen sich diese erschließen? Welche Chancen und Risiken sind dabei zu berücksichtigen. Die DLR-Projektstudie will Antworten auf diese Fragen geben.

Der nachfolgende Auszug schildert beispielhaft die Konzeptentwicklung und in den Folgekapiteln die Gewichtsanalyse sowie -optimierung für ein ICx-Dach aus Faserkunststoffverbunden sowie die Ergebnisse der Kostenanalyse und gibt Empfehlungen für den erfolgreichen Einsatz von Faserkunststoffverbunden in Strukturbauteilen von Schienenfahrzeugen.

2.1. **Gewicht und Kosten für ein ICx-Dach aus Faserkunststoffverbund**

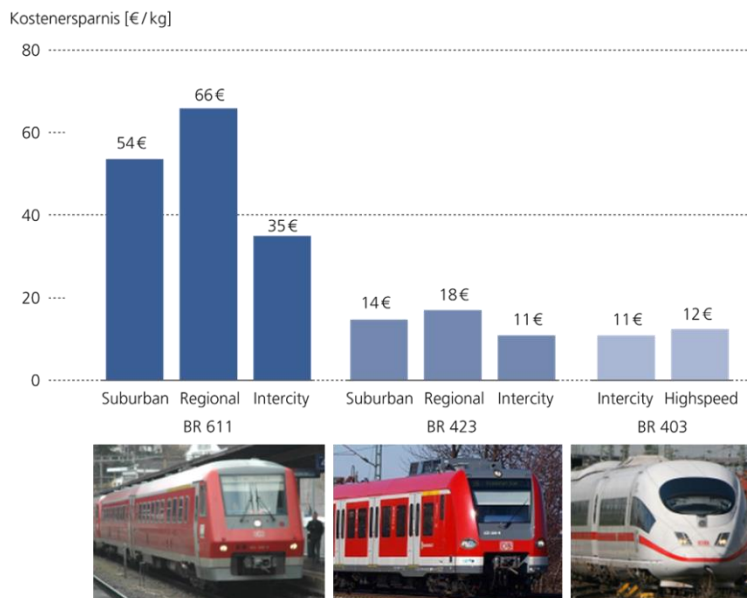
Mit seiner Expertise in FKV-Bauweisen für die Luft- und Raumfahrt sowie für den Next Generation Train (NGT) hat das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik in Zusammenarbeit mit dem Institut für Fahrzeugkonzepte in einer Projektstudie die aktuellen Chancen, Risiken und Kosten von FKV-Leichtbau-Technologien, insbesondere mit Kohlenstofffaser verstärkten Kunststoffen (CFK), im Schienenfahrzeugbau untersucht (*Nickel, 2016*).

Auftraggeber war das CFK Valley e. V. unter Beteiligung der Deutschen Bahn AG, des Verbandes der Bahnindustrie in Deutschland sowie der Schienenfahrzeughersteller Alstom Transport Deutschland GmbH, Bombardier Transportation GmbH, Siemens AG und Voith Turbo Scharfenberg GmbH & Co. KG. Aufgrund der erwarteten zunehmenden Bedeutung stehen Vollbahnfahrzeuge, insbesondere Triebzüge, im Fokus der Untersuchungen.

Beweggründe sind verschärfte Umweltauflagen hinsichtlich Energieverbrauch, Schadstoff- und Lärmemissionen sowie Recycling bei kostengünstiger Fertigung und hoher Wirtschaftlichkeit. Zudem müssen Mehrgewichte von immer aufwendigerer Sicherheits- und Komfortausstattung

kompensiert werden. Zulässige Radsatzlasten sowie das notwendige Reibgewicht bilden den Rahmen für erforderliche Leichtbaumaßnahmen.

Wieviel darf Leichtbau kosten? Die Energiekostensparnis je eingespartem Kilogramm Masse über einen Zeitraum von 30 Jahren für unterschiedliche Fahrzeugtypen zeigt, dass je nach Einsatz- und Streckenprofil zwischen 11 und 66 Euro pro Kilogramm Masseinsparung für Leichtbaumaßnahmen aufgewendet werden können, siehe Abbildung 2-1 (Dittus, 2013).



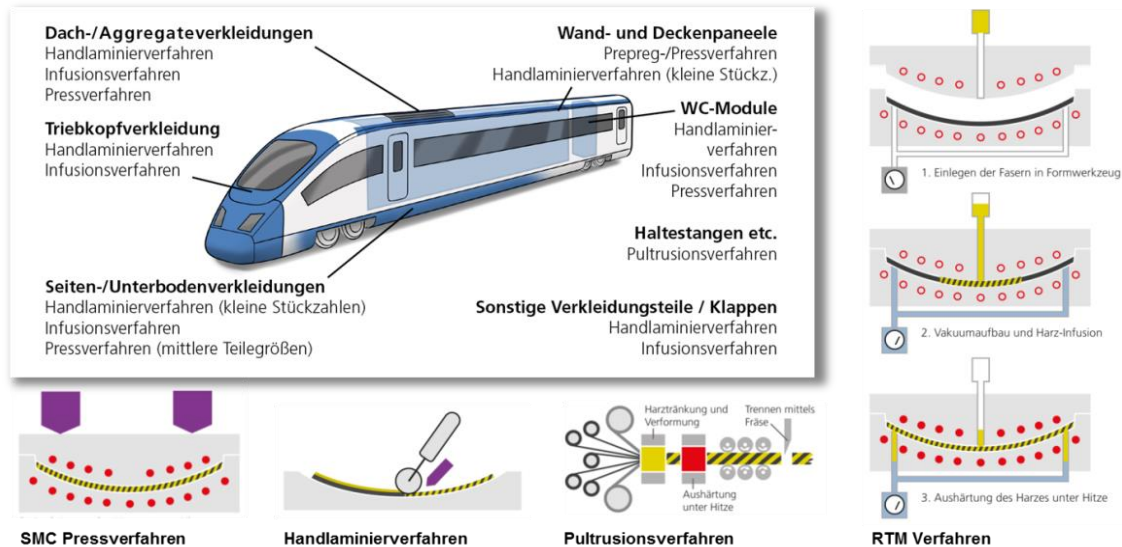
2-1 Energiekostensparnis je eingespartem Kilogramm Masse über 30 Jahre (Dittus, 2013)

Eine Recherche zum Stand der Technik bei FKV-Anwendungen in Schienenfahrzeugen ist Grundlage für das weitere Vorgehen und betrachtet die folgenden Punkte:

- Grundlagen des Leichtbaus – Einordnung, Definition und Einflüsse
- Durchgeführte Forschungsstudien nach Hauptbaugruppen (DIN EN 15380-2, 2006).
- Akteure in Forschung- und Entwicklung
- Heute in Schienenfahrzeugen eingesetzte FKV-Bauteile
- Aktuelle FKV-Fertigungsverfahren im Schienenfahrzeugbau
- FKV-Leichtbauanwendungen in Luftfahrt, Raumfahrt, Windenergie (WEA), Automobil- und Schiffbau – Unterschiede, Gemeinsamkeiten, Einsatzhemmnisse im Schienenfahrzeugbau

Aktuell werden in Schienenfahrzeugen vor allem glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) für Innen- und Außenverkleidungen eingesetzt und zumeist mit den dargestellten Fertigungsverfahren produziert, siehe Abbildung 2-2.

FKV in Schienenfahrzeugen und Beispiele für Fertigungsverfahren



2-2 FKV in Schienenfahrzeugen und Beispiele für Fertigungsverfahren (Nickel, 2016)

Ansätze für einen weitergehenden Einsatz von GFK/CFK-Strukturbauteilen in Schienenfahrzeugen machen zu Leichtbaupotenzialen und deren Kosten meist nur sehr pauschale Angaben und ermöglichen nicht die angestrebte umfassende Bewertung.

Kern der Studie ist daher die Analyse von FKV-Leichtbaupotenzialen und der damit verbundenen Kosten an einem konkreten Beispielbauteil. Dazu werden wesentliche Randbedingungen, z. B. Bauteilauslegung, geeignete Fertigungsverfahren, Brandschutz, elektrische Leitfähigkeit und EMV, Akustik, Life Cycle (LCA), etc. prinzipiell berücksichtigt.

2.2. Schienenfahrzeugbauteilauswahl für Gewichts- und Kosten-Analyse

Wie Recherchen und Betrachtungen zeigen, finden sich in der Literatur zu FKV-Leichtbaupotenzialen im Schienenfahrzeugbau und den damit verbundenen Kosten meist nur relativ pauschale Angaben. Diese allein ermöglichen nicht die mit der durchgeführten Projektstudie angestrebte umfassende Bewertung. Um zu aussagekräftigen Ergebnissen zu gelangen, sollen daher an einem konkreten Bauteil Leichtbaupotenziale und Kosten detailliert ermittelt werden.

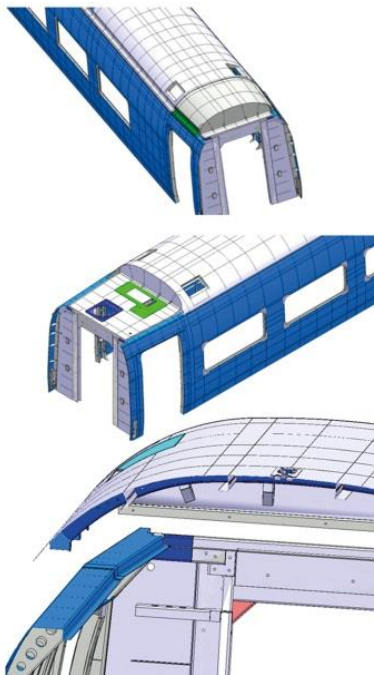
Mit den bisher gewonnenen Erkenntnissen geht es im Folgenden um die Auswahl eines geeigneten Strukturbauteils. Aufgrund ihrer großen Anteile am Gesamtgewicht eines Schienenfahrzeuges kommen dafür insbesondere der Wagenkasten, die Fahrwerke und der Innenausbau in Frage.

Um möglichst große Gewichtseinsparungen erreichen zu können, müssen die spezifischen Eigenschaften der Faserkunststoffverbunde bestmöglich ausgenutzt werden. Die hohen gewichtsbezogenen Steifigkeiten und Festigkeiten in Faserrichtung kommen besonders gut bei ein- oder zweiachsig belasteten Bauteilen zum Tragen, das sind zum Beispiel (pultrudierte) unidirektional verstärkte Profile oder (flächige) Membranen. Aufgrund ihres Aufbaus aus einzelnen Laminatschichten, bei denen die Werkstoffeigenschaften senkrecht zur Faser maßgeblich von den Matrixkennwerten bestimmt werden, sind Faserkunststoffverbunde empfindlich gegenüber Stoß- und Schlagbeanspruchungen. Es gilt daher, diese sogenannten Impactbeanspruchungen möglichst zu vermeiden oder durch geeignete Maßnahmen, Schutzschichten, etc. ihre Auswirkungen zu begrenzen.

Faserkunststoffverbunde bieten darüber hinaus aufgrund ihres Aufbaus aus mehreren Komponenten - Fasern und (duroplastische) Matrices - aus denen bei der Herstellung Faserkunststoffverbundwerkstoff und Bauteil gleichzeitig entstehen, die Möglichkeit weitere Funktionen zu integrieren. So kann beispielsweise in Sandwichstrukturen der (Schaum-)Kern neben seiner Tragfunktion auch zur thermischen und/oder akustischen Isolierung beitragen, Kanäle zur Kabel- oder Medienführung aufnehmen oder weitere Funktionalitäten bieten. Damit lassen die Leichtbaugüte und auch die Kosteneffizienz von Faserkunststoffverbundstrukturen weiter verbessern. Besonders erfolgreiche FKV-Anwendungen in anderen Branchen bestätigen dies.

Diesen Überlegungen folgend wird ein großes Bauteil gesucht, welches schalenförmig ist und idealerweise neben der lasttragenden weitere Funktionen integriert. Zusätzliche Auswahlkriterien sind eine möglichst einfache Geometrie, die im Rahmen der Studie betrachtet werden kann und eine möglichst günstige Einbaulage unter Vermeidung besonders Impact gefährdeter Bereiche, die besondere Anforderungen an die Behandlung stellen und über den Studienumfang hinausgehen. Leichtbaumaßnahmen fern dem Schwerpunkt wirken sich zusätzlich positiv auf die Fahrdynamik aus.

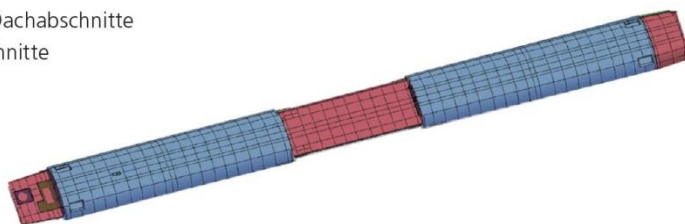
Unter Berücksichtigung der angeführten Aspekte fällt die Wahl auf das Dach eines ICx-Mittelwagens, für den die erforderlichen Daten für grundlegende Betrachtungen bereitgestellt werden können. Die Wagenkästen der ICx-Fahrzeuge sind in einer Stahlschweißkonstruktion in Differenzialbauweise ausgeführt, siehe Abbildung 2-3.



2-3 Wagenkasten eines ICx-Mittelwagens als Schweißkonstruktion in Stahl-Differenzialbauweise [BT Hennigsdorf]

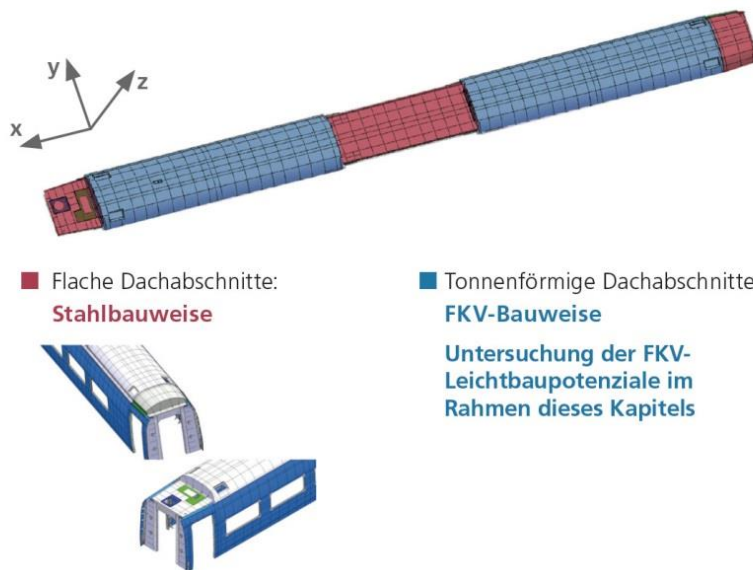
Das Dach eines solchen ICx-Mittelwagens ist grob in fünf Bereiche gegliedert: zwei flache Dachabschnitte über den Einstiegen an den Fahrzeugenden, einem flachen Bereich in der Fahrzeugmitte, auf dem die Klimaanlage angebracht ist, sowie zwei ca. 10 m lange tonnenförmige Segmente, siehe Abbildung 2-4.

- Tonnenförmige Dachabschnitte
- Flache Dachabschnitte



2-4 ICx-Mittelwagen-Dachbereiche

Im Rahmen des möglichen Studiumumfangs ist eine machbare und sinnvolle Detailtiefe festzulegen. Unter dieser Voraussetzung konzentrieren sich die weiteren Untersuchungen auf die vorherrschenden Dachbereiche, das sind die tonnenförmigen Abschnitte, siehe Abbildung 2-5, von denen eine aussagekräftige Tendenz für das Gesamtdach zu erwarten ist. Für die übrigen Bereiche wird wegen der vorwiegend mehrachsigen Spannungszustände die Beibehaltung der Stahlbauweise empfohlen.



2-5 Für die Ermittlung des FKV-Leichtbaupotenzials ausgewählte Dachbereiche des ICx-Mittelwagens

2.2.1. Auslegungskriterium

Das Hauptauslegungskriterium für die FKV-Ausführung des Wagenkastendaches ist die gleiche Steifigkeit wie bei dem Metallbauteil. Das bedeutet, die für die Auslegung relevanten Belastungen (z. B. DIN EN 12663-1, 2010) führen bei beiden Werkstoffvarianten zu gleichen Verformungen.

2.2.2. Randbedingungen und Zusatzfunktionen

Neben der erforderlichen Steifigkeit müssen Bauteil und Bauweise weitere Funktionen und Randbedingungen erfüllen:

- Gewährleistung der strukturellen Integrität (kein Versagen)
- Thermische Isolierung
- Kein größerer Gesamtbauraum als vorhandenes metallisches Dach
- Bauraum zur Führung des Hochspannungskabels in verkleideter Form
- Vorhandensein von Verbindungsmöglichkeiten z. B. Fügeflächen an Wagenstruktur
- Berücksichtigung von Brandschutzmaßnahmen
- EMV/elektrische Leitfähigkeit (Schutz bei Fahrdrahtabriss durch Kurzschluss)
- Schutz vor Versagen bei Impact
- Schutz bei Fahrdrahtabriss
- Gute Qualität der sichtbaren Oberflächen
- Niedrige Bauteilkosten / Kosteneffiziente Fertigung

2.2.3. Variationsparameter

Werkstoffe mit isotroper (gleichförmiger bzw. richtungsunabhängiger) innerer Struktur wie z. B. Metalle bieten für die Ermittlung einer optimalen Bauteilgestaltung und -auslegung die folgenden drei Variationsparameter an:

1. **Mechanische Kennwerte** abhängig von dem gewählten Werkstoff
2. **Bauteilgeometrie**
3. **Wanddicke**

Hochleistungs-, d. h. Endlosfaser verstärkte Faserkunststoffverbunde weisen aufgrund ihres inhomogenen Aufbaus aus gerichteten Verstärkungsfasern in einer Matrix richtungsabhängige Eigenschaften auf. Das bedeutet, die Eigenschaften in Faserrichtung sind andere als senkrecht dazu. Aus diesem Grund besteht ein weiterer Freiheitsgrad oder Optimierungsparameter, der berücksichtigt werden muss:

4. Faserausrichtung

2.2.4. Vorgehen bei der Berechnung

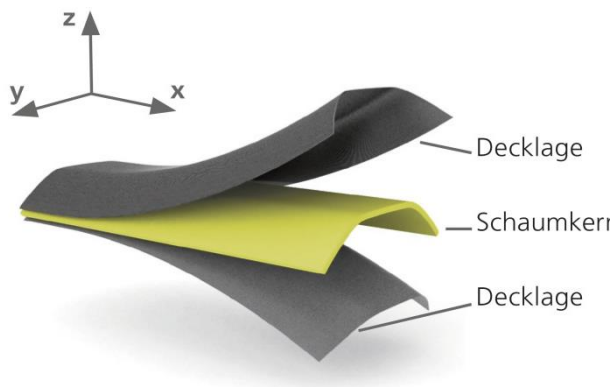
Für die effiziente Suche nach der optimalen Bauteilauslegung innerhalb der großen möglichen Lösungsmenge soll eine FEM-basierte, möglichst weit automatisierte Optimierung verwendet werden.

Da grundsätzlich viele verschiedene Lösungen existieren und nicht alle Randbedingungen quantitativ erfassbar sind und automatisiert werden können, wird als Startpunkt für die Optimierung ein auf umfassender FKV-Expertise beruhendes geeignetes Bauweisenkonzept entwickelt.

2.3. Grundlegendes Bauweisenkonzept

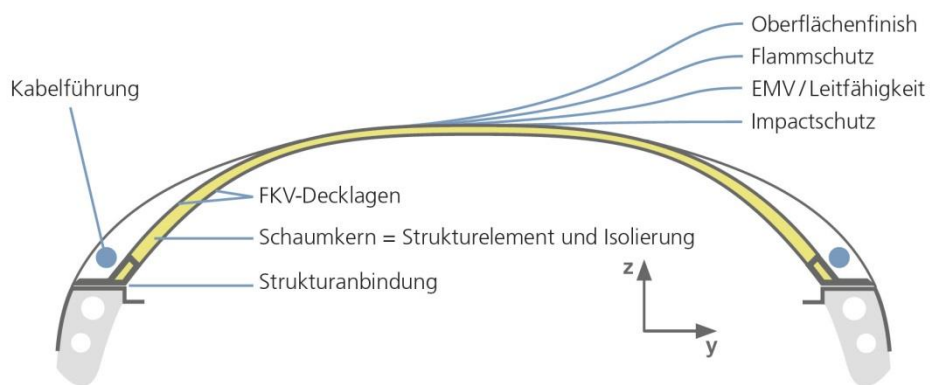
Die Forderung nach hoher Leichtbaugüte, entsprechend einem besonders geringen Gewicht, und hoher Kosteneffizienz bedingt ein Bauweisenkonzept, das die Leichtbaupotenziale von Faserkunststoffverbunden so weit wie möglich ausnutzt.

Mit der bei Faserkunststoffverbunden bestehenden Möglichkeit zur Integration zusätzlicher Funktionen lassen sich häufig weitere Gewichts- und Kostenvorteile erschließen. Vor diesem Hintergrund und der geforderten Zusatzfunktion „Isolierung“ bietet eine Faserkunststoffverbund-Sandwichbauweise große Vorteile, da sie neben ihrer hohen Leichtbaugüte mit dem vorhandenen strukturellen Schaumkern eine Isolierfunktion in einfacher Weise verbinden kann, siehe Abbildung 2-6.



2-6 Prinzipdarstellung Faserverbund-Sandwichbauweise

Ausgehend von dieser Grundlage und unter Berücksichtigung der oben genannten weiteren Randbedingungen wurde als Startpunkt für die automatisierte Optimierung das in Abbildung 2-7 dargestellte Bauweisenkonzept entwickelt.



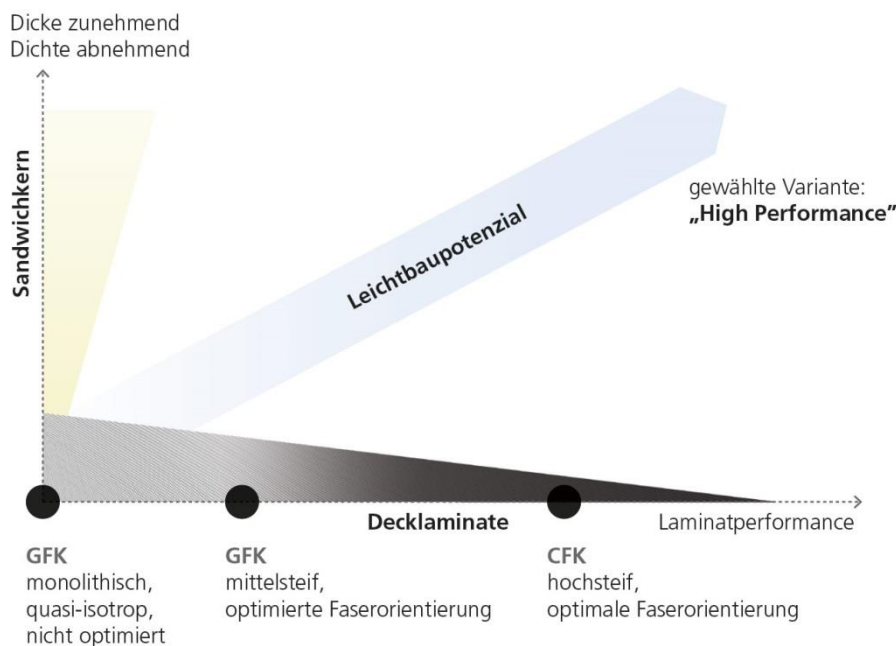
2-7 Aufbau und Randbedingungen

Hierbei wird das Stahldach durch die oben genannte FKV-Sandwichbauweise ersetzt, wobei der strukturelle Schaumkern die Aufgabe der Wärmeisolation übernimmt. Die Anbindung an die Stahlstruktur erfolgt an den oberen Seitenwandabschlüssen kraft- und gegebenenfalls auch formschlüssig. Die detaillierte Auslegung der Strukturanbindung ist jedoch nicht Bestandteil dieser Untersuchungen.

Die äußere Decklage der FKV-Dachstruktur wird ergänzt um ein Oberflächenfinish, z. B. Gelcoat, Flammschutz und Kupfernetz/-gestrick zur Gewährleistung der erforderlichen Leitfähigkeit, um im Falle eines Fahrdrahtabrisses umgehend einen Kurzschluss und damit Stromabschaltung im Streckenabschnitt herbeizuführen. Als Impactschutz sind weiterhin zusätzliche Glasfasergewebelagen vorgesehen.

2.4. Leistungsklasse

Um das als Ziel der Studie formulierte maximal mögliche Leichtbaupotenzial ermitteln zu können, sind die Parameter der Sandwichbauweise dahingehend festzulegen. Das Prinzip der Sandwichbauweise beruht darauf, dass zwischen zwei dünnen zugfesten Decklagen ein leichtes, druckfestes Kernmaterial eingebracht wird. Das Leichtbaupotenzial steigt dabei mit zunehmender Festigkeit der Decklagen sowie zunehmender Kerndicke und Druckfestigkeit und abnehmender Kerndichte. Diese Beziehung ist im Folgenden grafisch veranschaulicht, siehe Abbildung 2-8.



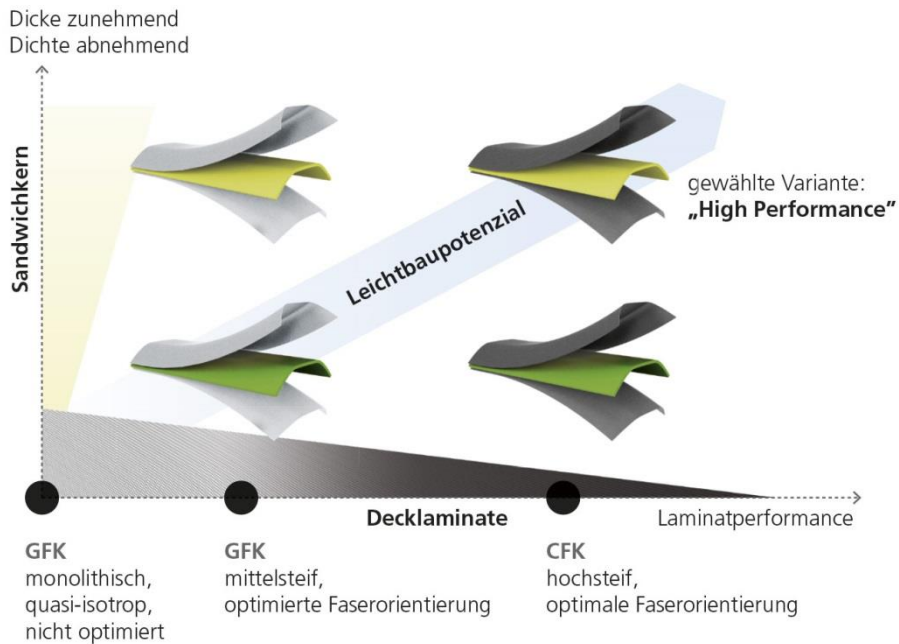
2-8 Variationsparameter: Leichtbaupotential abhängig von Laminatperformance und Sandwichkern

Je nach Wahl der Variationsparameter sind damit verschiedene Leistungsklassen darstellbar. Das Leichtbaupotenzial der Decklamine nimmt dabei in der Reihenfolge der Auflistung zu, d. h. von geringen Werten bei nicht optimierten, quasi-isotropen GFK-Laminaten über hinsichtlich der Faserorientierungen bereits deutlich optimierte mittelsteife GFK-Deckschichten bis hin zu hochfesten und -steifen CFK-Deckschichten mit optimaler Faserorientierung. Durch Paarung mit Kernmaterialien zunehmender Höhe und geringstmöglicher Dichte bei entsprechender Druckfestigkeit lassen sich optimal auf den Verwendungszweck abgestimmte Sandwichstrukturen aufbauen.

Generell steigt die Leistungsfähigkeit, z. B. die Biegesteifigkeit, einer FKV-Sandwichstruktur bei Verwendung von einem

- **(Schaum-)Kern hoher Dicke und Druckfestigkeit und geringer Dichte**
- **sowie C-Fasern mit hohem E-Modul („steif“) und optimaler Ausrichtung.**

Mit dem Ziel der höchsten Gewichtseinsparung wird die leistungsfähigste Variante gewählt, wie in Abbildung 2-9 veranschaulicht.



2-9 Gewählte Variante „High Performance“ mit hochsteifen, richtungsoptimierten CFK Decklaminaten und einem leichten Schaumkern großer Dicke und Druckfestigkeit

3. Einführung in die numerische Optimierung

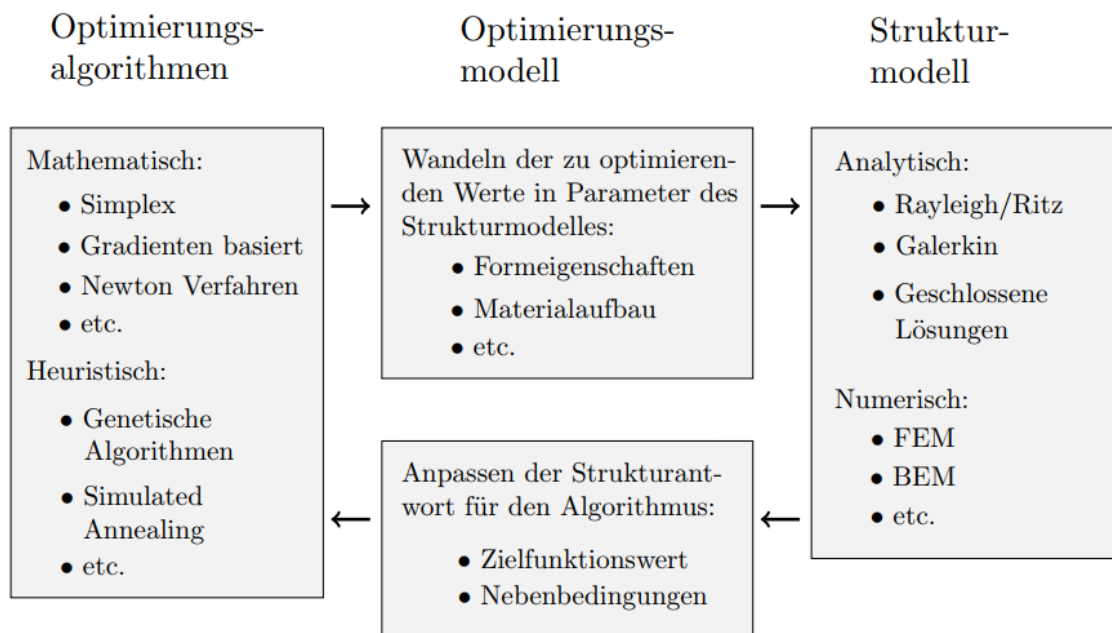
Die ideale Struktur für die Erfüllung einer Funktion ist in der Realität durch die Eigenschaften der zur Verfügung stehenden Materialien häufig nicht zu erreichen. Die beste kompromissbehaftete Lösung für diese Funktionserfüllung wird als Optimum bezeichnet. Die zum Auffinden dieser Lösung benötigten Schritte werden in ihrer Gesamtheit daher als Optimierung bezeichnet. Jede Möglichkeit zu versuchen und die Beste auszuwählen, die so genannte „Brute Force-Methode“, ist pauschal gesehen ein heuristischer Optimierungsansatz. Grundsätzlich wird jedoch nach Algorithmen gesucht, die deutlich weniger rechenzeitaufwändig sind und dadurch eine reelle Chance haben, in einem immer schneller werdenden Produktentwicklungszyklus angewendet zu werden.

Optimierungsalgorithmen versuchen auf effiziente Art und Weise, eine Zielfunktion f unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen g zu minimieren. Die Zielfunktion ist die Antwortfunktion der Struktur auf die gegebene Belastung. Die Struktur wird dabei eindeutig durch die gegebene Parameterschar x definiert. Jeder dieser drei Parameter kann in einem begrenzten Bereich liegen, oder komplett frei wählbar sein. Die Zielfunktion drückt die Systemantwort der Struktur bezüglich einer gewünschten Eigenschaft f aus. In vielen Fällen sind die Optimierungsalgorithmen auf mehrere Funktionsevaluierungen angewiesen, sodass man von einem iterativen Lösen durch den Algorithmus spricht. Häufig verwendete Zielfunktionen können sich auf das Gewicht einer Struktur, gewünschte Steifigkeiten, Eigenfrequenzen, aber auch Kosten beziehen. Für eine zielführende Optimierung muss der Anwender immer sicherstellen, dass das betrachtete Modell in der Lage ist, die gewünschte Zielfunktion unter Verwendung des Parametersatzes abzubilden. Muss mehr als eine Zielfunktion gleichzeitig berücksichtigt werden, spricht man von einer Mehrzieloptimierung. Die Anforderungen an die Formulierung des Optimierungsproblems steigen damit. In dieser Arbeit wird grundsätzlich von einem Ziel ausgegangen. Zusätzliche Ziele werden hingegen auf einen Mindestgrenzwert festgelegt und als Nebenbedingung implementiert.

Für die Modellerstellung werden Entwurfsvariablen benötigt. Diese haben einen direkten Einfluss auf die Zielfunktion, diese Sensitivität der Zielfunktion wird von einem Optimierungsalgorithmus genutzt, um eine gezielte Beeinflussung vorzunehmen. Die gezielte Anpassung der Parameterschar zum Erreichen einer minimalen Zielfunktionsantwort nennt man Optimieren. Die Auswahl der verwendeten Parameter und ihre Nutzung für eine Modellerstellung sind innerhalb einer Optimierungsaufgabe essentiell und haben einen bedeutenden Einfluss auf den Lösungsraum. Zu eng gefasste Parameter oder eine nicht korrekte Implementierung können eine eindeutige Modellerstellung verhindern und so die Lösungsfindung erschweren. In dieser Arbeit wird grundsätzlich auf die strukturelle Parameter und ihren Einfluss auf Steifigkeit und Gewicht eingegangen. Die Bandbreite an Parametern schwankt dabei von dem Materialverhalten und Bauraumgröße für die Topologieoptimierung bis hin zu möglichen

Splinebeschreibungen oder CAD basierten Geometrieparametern für die Shapeoptimierung. Aber auch Variationen an lokal die Geometrie beschreibenden Parametern von definierten Querschnittsformen sind für eine Optimierung nutzbar.

Eine übersichtliche Darstellung einer möglichen Aufteilung eines Optimierungsproblems ist in Abbildung 3-1 dargestellt.



3-1 Strukturoptimierung (nach Eschenauer, 2006)

3.1. Optimierungsalgorithmus

Innerhalb des Optimierungsalgorithmus' werden die Zielfunktionswerte bezüglich der Variationen der Optimierungsparameter evaluiert. Dies wird von dem Algorithmus genutzt, um eine neue Parametervariante zu generieren, welche die Struktur verbessert und gleichzeitig die Nebenbedingungen erfüllt. Die Auswahl an möglichen Algorithmen ist enorm. Eine Allgemeingültigkeit für jedes Problem kann nicht sichergestellt werden. Das No Free Lunch Theorem beschäftigt sich mit der komplizierten Auswahl eines möglichen Algorithmus' für bestimmte Probleme. Ein für jedes Problem gut geeigneter Algorithmus existiert diesem zufolge nicht.

3.2. Optimierungsmodell

Das Optimierungsmodell dient als Schnittstelle und übersetzt die abstrahierten Parameter z. B. in eine direkte Beschreibung strukturmechanischer Eigenschaften des untersuchten Modells. Seine

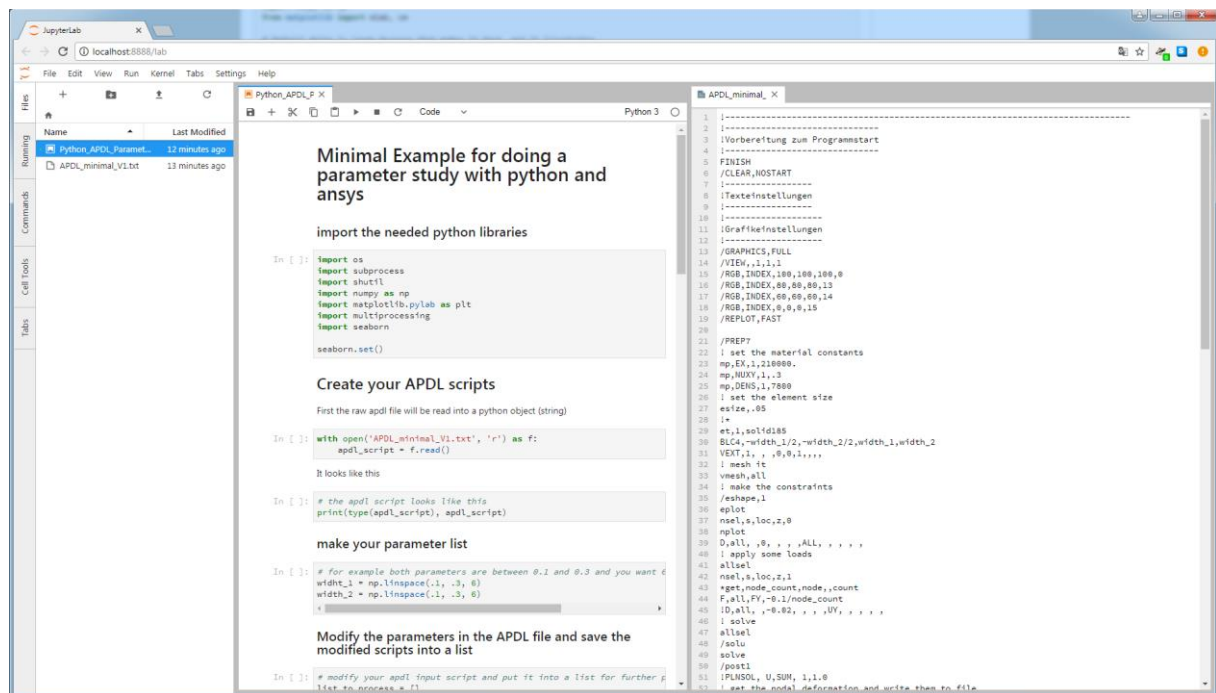
zweite Aufgabe ist die Rückübersetzung der berechneten Systemantwort und der Ergebnisse der Nebenbedingungen in direkt vom Optimierungsalgorithmus nutzbare Werte. Die Schwierigkeit der meisten Optimierungsprobleme liegt in der sinnvollen Wahl der zu optimierenden Parameter und deren Verknüpfung untereinander. Dies muss innerhalb des Optimierungsmodells implementiert werden.

3.3. Strukturmodell

Heutzutage hat sich in weiten Bereichen die Lösung komplexer strukturmechanischer Probleme mithilfe der Finiten Element Methode (FEM) durchgesetzt. Die verfügbare Standardsoftware wird seit Jahrzehnten weiterentwickelt und ist aus der Produktentwicklung nicht mehr wegzudenken. Nachteilig wirkt sich die benötigte Rechenzeit auf das gesamte Optimierungsproblem aus. Oftmals ist ein Großteil der benötigten Dauer nicht dem Optimierungsalgorithmus geschuldet, sondern der Lösung des durch die FEM aufgestellten Gleichungssystems. Soweit möglich ist eine analytische Lösung einer numerischen vorzuziehen, da diese deutlich geringe Anforderungen an die Größe des Gleichungssystems stellt. Aufgrund der Komplexität heutiger Strukturen ist dies jedoch die Ausnahme.

3.4. Beispiel einer Strukturoptimierung mit Python/Ansys

Als Nutzeroberfläche für die Untersuchung wurde ein Jupyter Notebook gewählt. Dieses beinhaltet übersichtlich alle Arbeitsschritte für das gewählte Beispiel. Es ist für die Aufbereitung des Ansys Codes zuständig, für das Starten und Auswerten des Ansys-Laufes und für die Darstellung der Ergebnisse. Die Oberfläche ist in Abbildung 3-2 dargestellt.

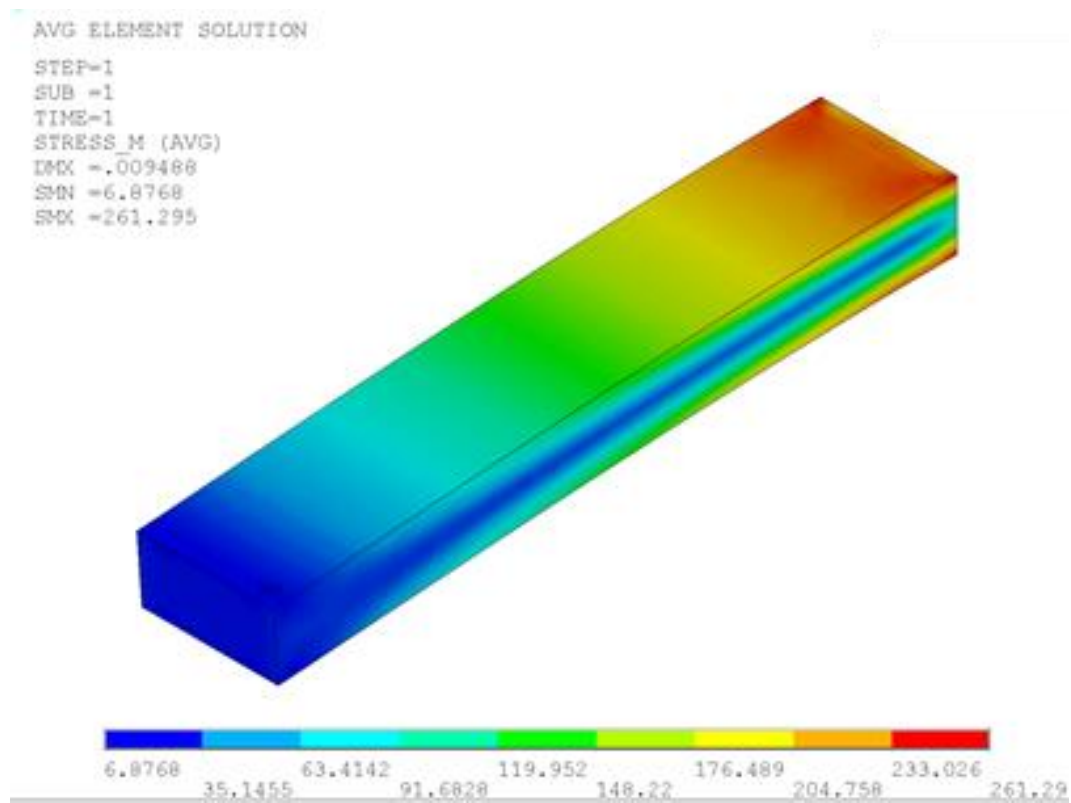


3-2 Jupyter Lab GUI und die bereitgestellten Dateien für die automatisierte Bearbeitung

Das beispielhaft gewählte Problem des Biegebalkens wurde anhand der Parameter Breite und Höhe des Balkens implementiert. Die Länge ist konstant und nicht Parameter der Untersuchung. Das interessante Ergebnis ist die erreichbare Durchbiegung des Balkens an seinem freien Ende und die gleichzeitig auftretende maximale Vergleichsspannung.

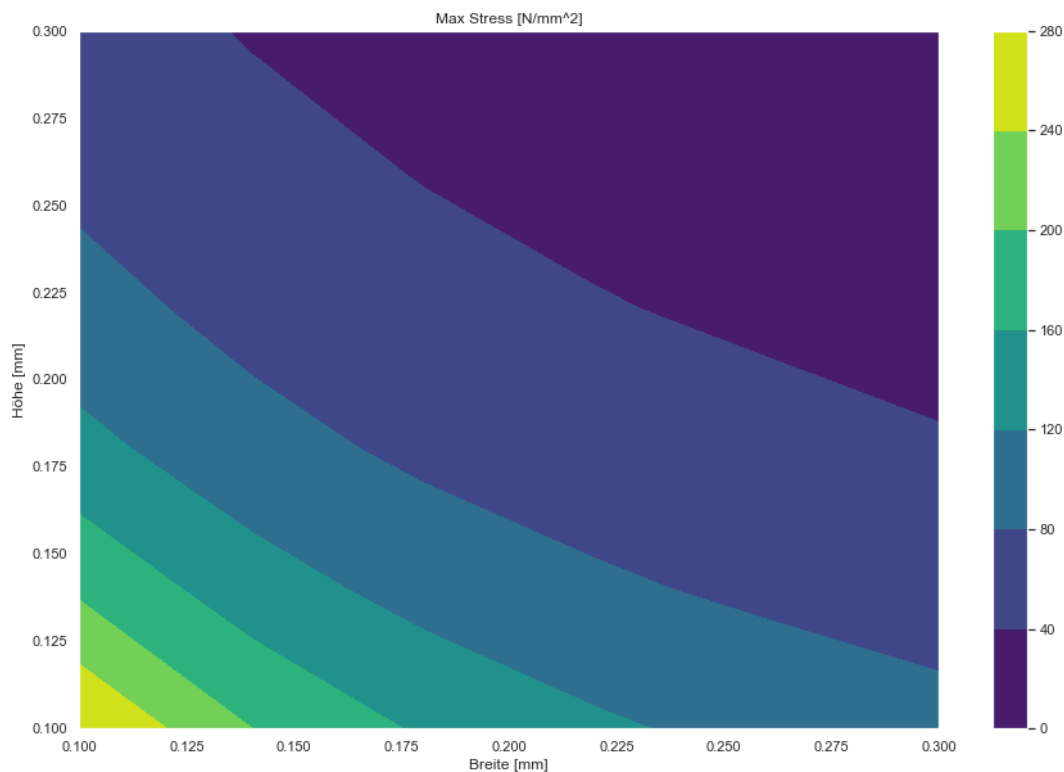
Der Parameterraum für die Breite und Höhe des Balkens muss gewählt werden, ebenso die Verteilungsfunktion für das Erstellen des Design of Experiments. Im einfachsten Fall sind die Punkte uniform verteilt. Daraus ergibt sich ein Berechnungsaufwand, welcher exponentiell mit der Anzahl an Parametern steigt. Dies ist der Hauptgrund für eine numerische Optimierung, welche die Anzahl an Rechnungen handhabbar machen soll.

Abbildung 3-3 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der Simulation in Form der maximalen Durchbiegung (DMX) und der maximalen Vergleichsspannung (SMX). Deutlich sichtbar ist die Zunahme der von-Mises Spannung zur Einspannung hin, ebenso ist die neutrale Faser leicht zu erkennen.



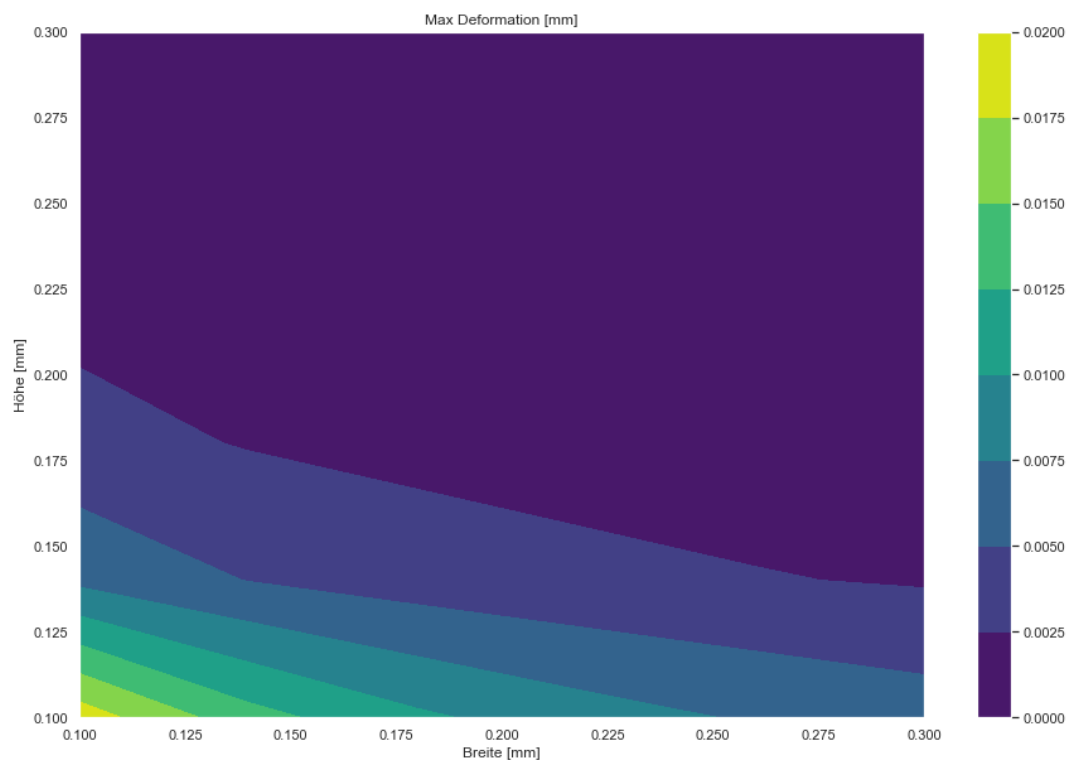
3-3 Vergleichsspannungsverteilung der Finite Element Simulation für eine exemplarische Rechnung des Biegebalkenmodells

Abbildung 3-4 verdeutlicht den nichtlinearen Zusammenhang der untersuchten Parameter Breite und Höhe auf die maximale Spannung in diesem einfachen Modell. Je kleiner das gesamte Flächenträgheitsmoment des Balkens ist, desto größer sind die auftretenden Spannungen. In diesem Modell sind diese maximalen Spannungen immer an der Einspannung zu finden und aufgrund der Zwängungen durch die Lagerungen zu begründen.



3-4 Beispielhaftes Ergebnis der Parameteruntersuchung, maximale Vergleichsspannung im Modell bezogen auf Breite und Höhe

Abbildung 3-5 zeigt die Durchbiegung des Modells basierend auf Veränderungen der Breite und Höhe des Biegebalkens. Es ist deutlich sichtbar, dass die Höhe des Balkens einen größeren Einfluss auf die berechnete Durchbiegung aufweist, als die Breite!



3-5 Beispielhaftes Ergebnis der Parameteruntersuchung, maximale Deformation im Modell bezogen auf Breite und Höhe

4. Berechnung

Die Ermittlung des Leichtbaupotenzials einer Struktur innerhalb eng gesteckter, realistischer Anforderungen ist ein komplexes Unterfangen. Aus diesem Grund werden bei der Vordimensionierung alle Untersuchungen direkt mithilfe eines numerischen Finite Elemente-Modells (FE-Modell) durchgeführt. Für diese Aufgabe eignet sich das Simulationsprogramm Ansys. Es beinhaltet die benötigten Technologien, um einen Faserkunststoffverbund sowie verschiedene Bauweisen abzubilden.

Für ein möglichst geringes Gewicht des Zielbauteils müssen die sehr guten spezifischen FKV-Materialsteifigkeiten voll ausgenutzt werden. Diese sind in Faserrichtung am größten, was eine spezifische Ausrichtung der einzelnen Lagen erfordert. Für eine Optimierung des untersuchten Bauteils bedeutet dies im Vergleich zu einem rein isotropen Material wie bereits geschildert einen zusätzlichen Parameter für jede untersuchte Faserrichtung einer Einzellage. Für eine Optimierung der Bauteilmasse unter Berücksichtigung verschiedenster Kriterien und Parameter ist ein automatisierter Prozess unumgänglich, um Zeit und Aufwand beherrschbar zu halten.

Der für die Optimierung genutzte Prozess unterteilt sich in einen Abschnitt für die Lösung des FE-Modells und in einen weiteren für die restlichen mathematischen Berechnungen. Der Optimierungsalgorithmus und jegliche darauf aufbauende Funktionalität werden durch die interpretierte Programmiersprache Python abgebildet. Insbesondere wird die Optimierungsbibliothek „pyOpt“ verwendet. Sie eignet sich hervorragend, um komplexe Optimierungsprobleme objektorientiert darzustellen. Insbesondere kann eine problemangepasste Auswahl des Algorithmus einfach vorgenommen werden.

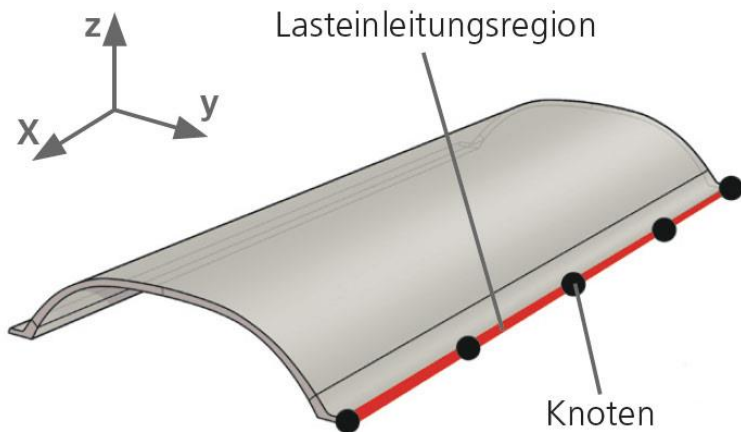
Im Folgenden wird auf die nötigen Randbedingungen, die Generierung der Steifigkeitsnebenbedingungen und die verwendeten Geometrieparameter für eine erfolgreiche Optimierung eingegangen.

4.1. Vor- und Aufbereitung der Lasten und Randbedingungen

Die Daten für einen ICx-Stahlwagenkasten als Referenzstruktur wurden von der Firma Bombardier Transportation GmbH bereitgestellt. Diese umfassten Knoteninformationen über die Raumkoordinaten sowie die berechneten Steifigkeiten bei gegebenen Verformungen. Insbesondere wurden innerhalb der ursprünglichen Modellierung des Referenzmodells Schalenelemente verwendet, wodurch das Verformungsverhalten anhand translatorischer und rotatorischer Freiheitsgrade beschrieben wird. Daher wurden neben den Freiheitsgraden jedes Knotens auch äquivalente Kräfte und Momente übergeben.

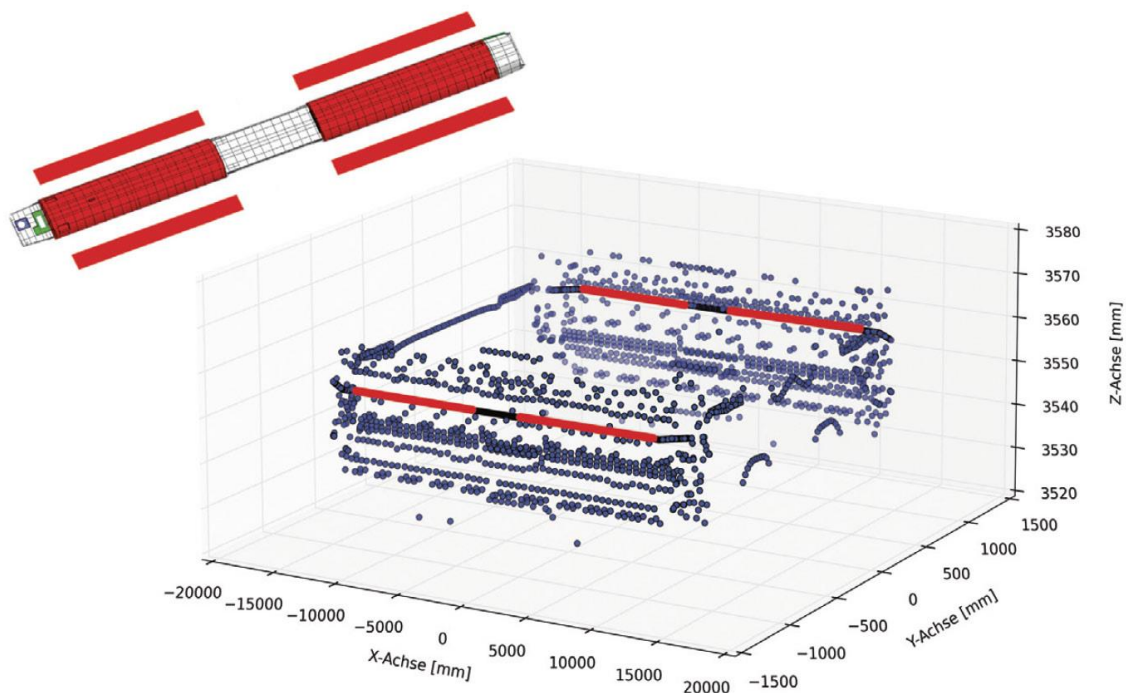
4.2. Kraft-Angriffsbereich

Abbildung 4-1 zeigt eine vereinfachte Darstellung der Lasteinleitungsregion (roter Streifen / schwarze Punkte) an einer Seite eines der beiden tonnenförmigen Dachsegmente, die im Rahmen dieser Studie betrachtet werden.



4-1 Vereinfachte Darstellung der Lasteinleitungsregion

Abbildung 4-2 veranschaulicht Größe und Lage dieser Bereiche, jeweils rot gekennzeichnet, bezogen auf das gesamte Wagenkastendach und zeigt darunter in einer dreidimensionalen Darstellung die zugehörigen Referenzknotenkoordinaten.



4-2 3D-Darstellung der Referenzknotenkoordinaten und der substituierten Bereiche

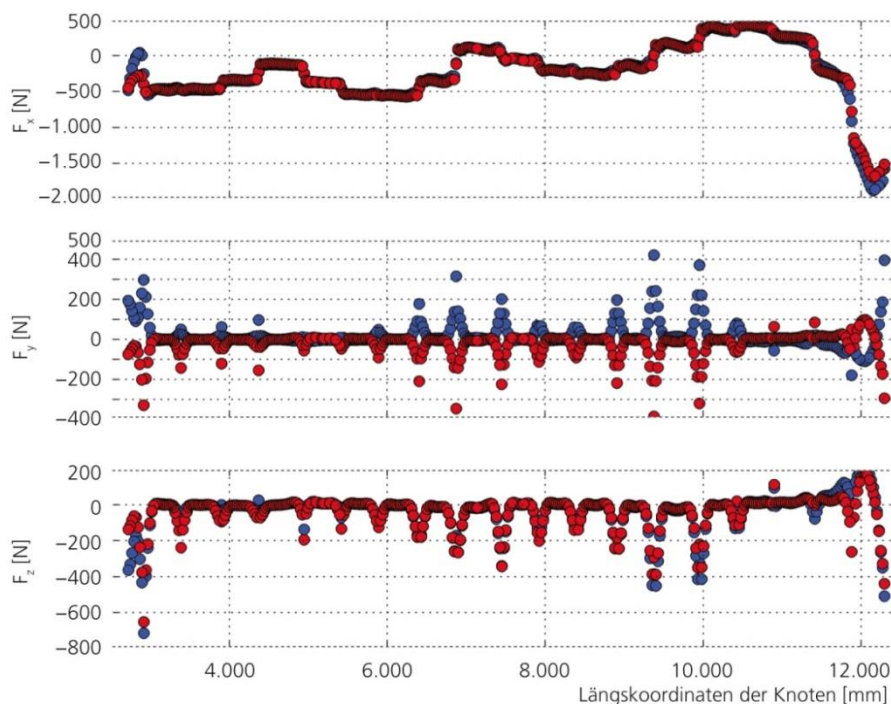
Der gewählte Ansatz, eine Ersatzstruktur mit mindestens gleichen Steifigkeiten zu berechnen, macht es nötig, eine Region zu definieren, in welcher ein Vergleich sinnvoll gezogen werden kann. Die betrachteten tonnenförmigen Bereiche liegen innerhalb des Referenzkoordinatensystems bei:

x – Achse: $2.698\text{mm} < x < 12.315\text{mm}$

y – Achse: $y_1 = -1.140\text{ mm}, y_2 = 1.140\text{ mm}$

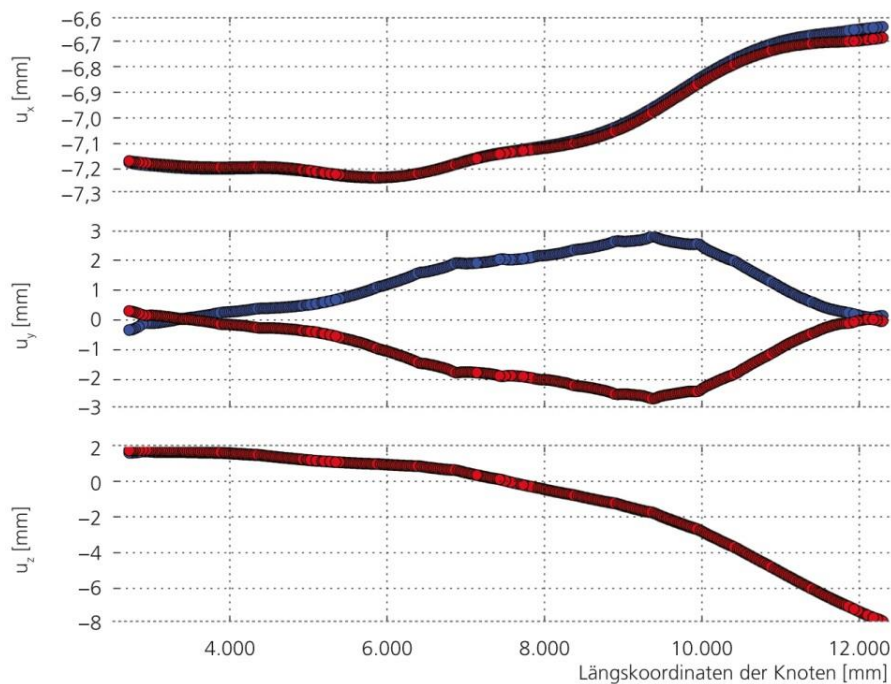
z – Achse: $z = 3.556\text{ mm}$

Anhand der getroffenen Eingrenzungen in Höhe und Länge können die gewählten Knoten als Ausgangspunkt für die Bestimmung der Randbedingungen dienen. Die nur für die ausgewählten Knoten verwendeten Informationen sind exemplarisch in Abbildung 4-3 für Lastfall 1 gezeigt. Dargestellt sind die für diesen Lastfall berechneten vektoriellen Anteile der resultierenden Knotenkräfte. Blaue Punkte kennzeichnen die Werte der Knoten auf der linken Seite des Wagens, das bedeutet, diese Knoten besitzen im globalen Koordinatensystem positive y-Positionswerte. Die roten Punkte repräsentieren die rechte Seite des Wagens. Anhand der geringen Unterschiede der Kräfte der gegenüberliegenden Knoten ist sichtbar, dass keine Symmetrie vorliegt. Ein Indiz für die Differenzialbauweise des Wagens sind die erkennbaren Sprünge im Verlauf der resultierenden Knotenkräfte, wobei zwischen den Spanten konstante Kraftniveaus vorliegen. Im Gegensatz dazu zeigen sich an den Spantpositionen deutlich erhöhte Reaktionskräfte. Zu beachten ist, dass die dargestellten Werte nur Auszüge aus dem globalen Deformationsverhalten des originalen FE Modells sind.



4-3 Lastfall Nr.1: Knotenkräfte

Die diese Reaktionskräfte bedingenden Verformungen des Wagenkastens sind wiederum für die betrachtete Schnittkante in Abbildung 4-4 dargestellt. Die anzustrebenden Steifigkeiten des Sandwichdaches orientieren sich somit an dem Produkt aus Knotenkraft und Knotenverschiebung. Dies entspricht der resultierenden Struktursteifigkeit für diese Belastung.

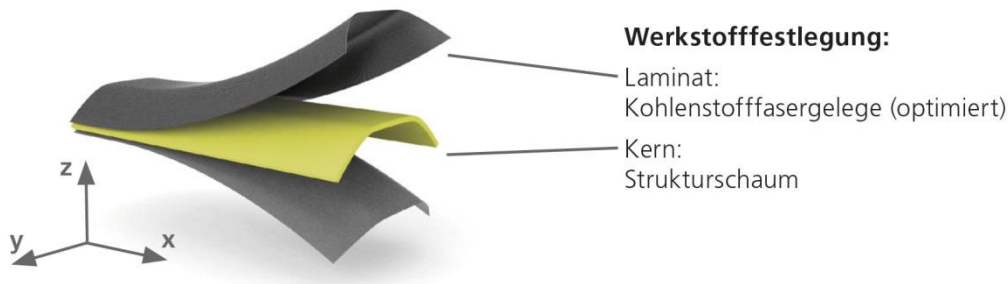


4-4 Lastfall Nr.1: Knotenverschiebungen

Die betrachteten Lastfälle nach (DIN EN 12663, 2010) werden alle in dieser beschriebenen Art aufbereitet, um für das zu dimensionierende Sandwichdach als Lastkollektiv wirken zu können. Das für die Auslegung genutzte Finite-Element-Modell wird im Folgenden beschrieben.

4.3. Materialdaten

Die in dieser Studie für die Optimierung der Masse verwendeten Materialkennwerte für den Faserkunststoffverbund und für den Schaumkern sind in Abbildung 4-5 und in Tabelle 4-1 zusammengefasst. Die immense Richtungsabhängigkeit der Steifigkeit der Einzellage des FKVs ist typisch für unidirektional ausgerichtete Fasern. Mit einem großen Steifigkeitsverhältnis ist es möglich, die Gesamtsteifigkeit des Laminates maximal zu beeinflussen. Bei vorzeitiger Beschränkung an diesem Punkt wird Leichtbaupotenzial verschenkt. Für eine Bewertung der Festigkeit bieten sich grundsätzlich zulässige Dehnungen der Einzellage an. Diese werden typischerweise in Zug- und Druckwerte und ebenfalls längs- und quer zur Faserrichtung untergliedert.



4-5 Werkstofffestlegung für die gewählte Variante „High Performance“

Werkstoffdetails: Fasern des Laminats		Werkstoffdetails Schaum*	
Material	Carbon HM-Faser	Material	Divinycell P60
Dichte	1,8 g/cm ³	Dichte	60 kg/m ³
E _{parallel}	446 GPa	Druckfestigkeit	0,6 MPa
E _{senkrecht}	8 GPa	Zugfestigkeit	1,2 MPa
V _{parallel, senkrecht}	0,3	Scherfestigkeit	0,45 MPa
ε _{parallel, zug}	0,009	E-Modul	47 MPa
ε _{parallel, druck}	-0,004	G-Modul	13 MPa
ε _{senkrecht, zug}	0,006	v	0,3
ε _{parallel, zug}	-0,02		
Bruchlast unter Zug	ca. 2.350 MPa		

* = FST-Prüfungen: DIN 5510: S4 ST2 SR2, AFNOR NF F 16-101: M1 F1

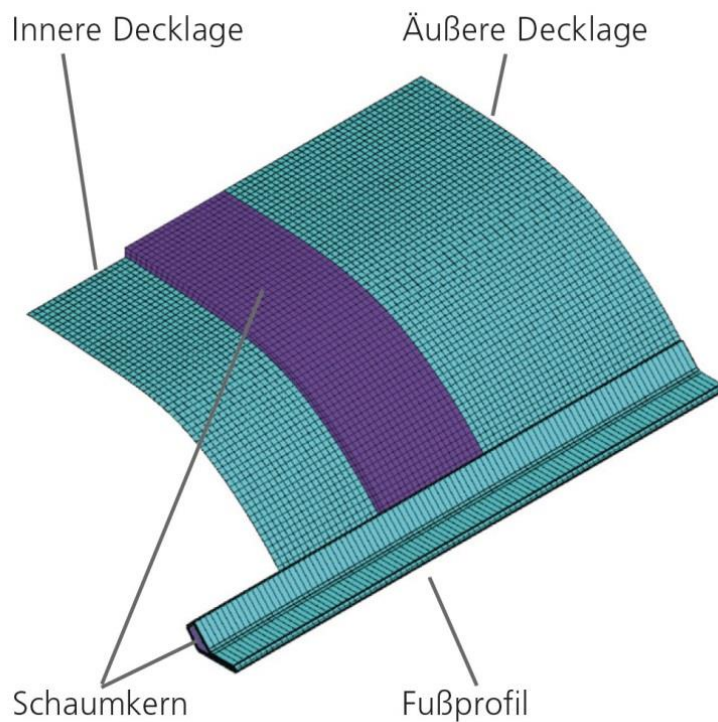
4-1 Materialkennwerte der für die Berechnung gewählten Variante „High Performance“

4.4. Aufbau des FE Modells

Das entwickelte FE-Modell orientiert sich in seinen äußeren Abmessungen an dem zulässigen Bauraum des Originaldaches in den tonnenförmigen Abschnitten. Der ausgewählte und zu untersuchende Bereich gibt somit die Abmessungen des Modells vor:

Länge	= 9.663 mm
Breite	= 2.280 mm
Höhe	= 460 mm
Schaumdicke	= 35 mm

Abbildung 4-6 zeigt die Bestandteile des Modells des Wagenkastendaches. Die geometrischen Abmessungen der Fußprofile und des verbindenden Dachprofils werden derart gewählt, dass eine Anbindung an die Referenzstruktur möglich ist.

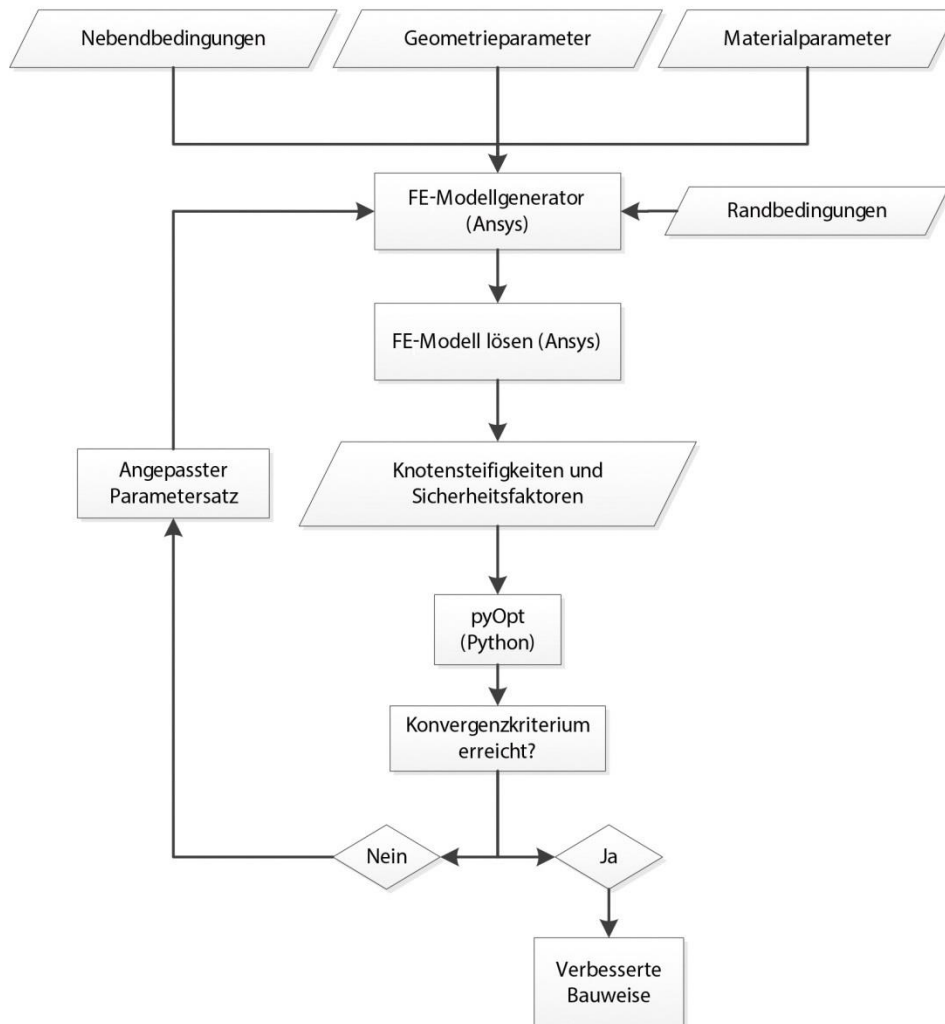


4-6 Querschnitt des modellierten FKV-Daches

Für die den Schaum modellierenden Volumina wurden 8-knotige Würfelemente (Abbildung: **Cyan**) verwendet. Auf diesen wurden dann, äquivalent zu der realen Struktur, 4-knotige Schalenelemente (Abbildung: **Türkis**) aufgebracht, in welchen der zu optimierende Laminataufbau eingebracht wurde.

4.5. Ablauf der Optimierungsrechnung

Ein Ablaufdiagramm der in dieser Studie genutzten **Optimierungsumgebung** ist in Abbildung 4-7 dargestellt.



4-7 Ablaufdiagramm der verwendeten Optimierungsumgebung

Ausgehend von zunächst festgelegten Geometrieparametern, materialspezifischen Kennwerten und den zu beachtenden Nebenbedingungen wird das Finite Element Modell durch den Modellgenerator in Ansys aufgebaut. Anschließend werden die nötigen Verschiebungsrandbedingungen von dem Modellgenerator eingelesen und aufgeprägt. Aus der nun generierten Lösung werden die nötigen Nebenbedingungen an pyOpt zur Optimierung übergeben. Durch den verwendeten „Augmented Lagrangian Particle Swarm“ Algorithmus werden im Anschluss günstige Parametersätze an den Modellgenerator zurückgeführt und erneut berechnet. Dieser Prozess wiederholt sich iterativ, bis eine Lösung gefunden ist, die alle Nebenbedingungen erfüllt und ebenfalls auskonvergiert ist.

4.6. Optimierungsparameter

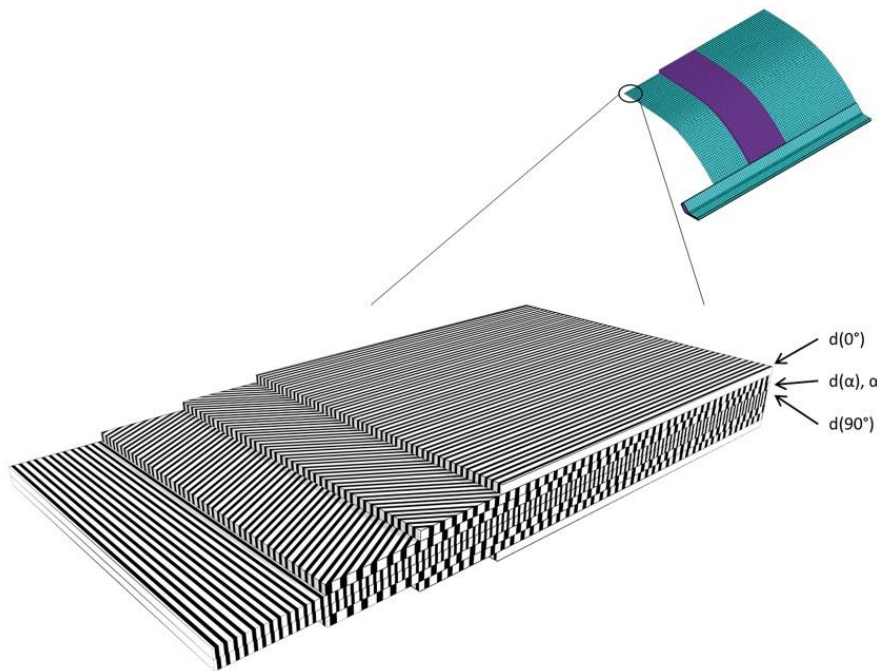
Das parametrische FE Modell wurde derart implementiert, dass alle relevanten Einflüsse auf das erwartete Ergebnis durch einen Parameter der Optimierung zugänglich gemacht werden können. Tabelle 4-2 fasst die kontinuierlichen Parameter sowie deren oberen und unteren Grenzen zusammen.

Parameter	Minimum	Maximum
$d_{\text{außen}}(0^\circ)$	0,16 mm	5,0 mm
$d_{\text{außen}}(90^\circ)$	0,16 mm	5,0 mm
$d_{\text{außen}}(\alpha)$	0,16 mm	5,0 mm
$d_{\text{innen}}(0^\circ)$	0,16 mm	5,0 mm
$d_{\text{innen}}(90^\circ)$	0,16 mm	5,0 mm
$d_{\text{innen}}(\alpha)$	0,16 mm	5,0 mm
$d_{\text{Profil}}(0^\circ)$	0,16 mm	5,0 mm
$d_{\text{Profil}}(90^\circ)$	0,16 mm	5,0 mm
$d_{\text{Profil}}(\alpha)$	0,16 mm	5,0 mm
$\alpha_{\text{außen}}$	10°	80°
α_{innen}	10°	80°
α_{Profil}	10°	80°

4-2 Optimierungsparameter und die zulässigen Wertebereiche

Die Materialstärken der betrachteten Faserhalbzeuglagen werden auf einen fertigungsgerechten Wertebereich beschränkt. Die Untergrenze wird auf eine minimale Dicke, in welcher eine Lieferbarkeit gewährleistet werden kann, festgelegt.

Die Faserwinkel der rotierbaren Einzellage können Werte zwischen 10° und 80° annehmen, um auch die Fertigungsoption Faserwickeltechnik einzuschließen. 0° entspricht der x-Achse des globalen Bezugssystems. Dabei ist zu beachten, dass ein vorteilhafter Laminataufbau symmetrisch und ausgewogen mit Bezug auf die Laminatmittelebene ist. Allgemein lässt sich dieser mit $(0, \alpha, -\alpha, 90)$ s beschreiben. Abbildung 4-8 visualisiert die angewendete Parametrisierung des Laminataufbaus.



4-8 Optimierungsparameter für ein symmetrisches, ausgewogenes Laminat

4.7. Allgemeine Randbedingungen

Ein essentieller Strukturkennwert ist der Sicherheitsfaktor gegen Festigkeitsversagen. Innerhalb der Optimierungsrechnungen wird für jeden betrachteten Lastfall das Versagen in jeder Einzellage anhand der materialspezifischen Dehngrenze sowie der zulässigen Spannung ausgewertet. Das jeweils begrenzende Kriterium wird für eine Bewertung der Lösung herangezogen.

Ein weiterer restriktiver Punkt in der Strukturauslegung ist eine reine Substitution des betrachteten Bauteils. Dafür muss sichergestellt sein, dass die mechanischen Eigenschaften des generierten Bauteils und des Originals vergleichbar sind. Das bedeutet, dass bei den aufgetragenen Verformungen gleiche Reaktionskräfte vorhanden sein müssen. Somit müssen die Verhältnisse der Steifigkeiten als Nebenbedingung der Optimierung formuliert werden. Das Optimierungsproblem lässt sich also auf folgende Aussage kondensieren:

Minimiere die Masse des Bauteils unter Einhaltung vorgegebener Steifigkeitseigenschaften sowie der Festigkeitskriterien.

Die dafür nötigen Nebenbedingungen der Optimierung werden im Folgenden erläutert.

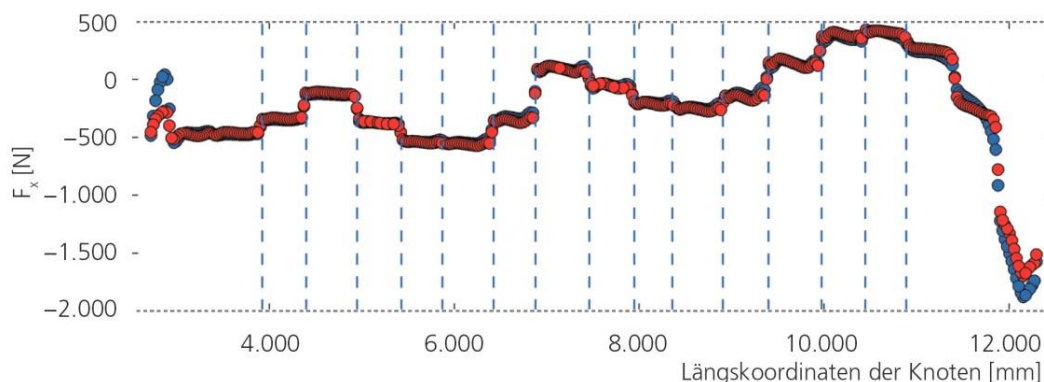
4.8. Festigkeitsnebenbedingungen

Die untersuchten möglichen Fasermaterialien müssen innerhalb jedes Lastschrittes auf ein mögliches Festigkeitsversagen hin untersucht werden. Dafür werden ertragbare Dehngrenzen des Fasermaterials in jeder Einzelschicht mit den berechneten Werten verglichen. Der so ermittelte Sicherheitsfaktor wird an den Optimierungsalgorithmus ausgegeben. Nicht berücksichtigt wurden mögliche Sicherheitsfaktoren des Schaums oder der Anbindung des Schaums an die Decklagen des Sandwichs.

4.9. Steifigkeitsnebenbedingungen

Der sinnvolle Vergleich zweier Bauweisen hinsichtlich ihrer Steifigkeiten ist eine besondere Herausforderung. Die originale Spantbauweise liefert unstetige Steifigkeiten. Insbesondere in Regionen der Spanten tritt erwartungsgemäß eine Zunahme auf, wohingegen eine Sandwichkonstruktion konträr dazu möglichst stetige Steifigkeitsverläufe bevorzugt. Wie zuvor erwähnt treten die Differenzen der Steifigkeiten als Nebenbedingung für die Optimierung auf. Ein knotenweises Vergleichen erhöht die Anzahl der Nebenbedingungen enorm und wirkt sich somit negativ auf die Optimierungsdauer aus. Aus diesem Grund werden abschnittsweise summierte Knotenkräfte verglichen. Insgesamt wurden 15 Abschnitte in dem betrachteten Bereich definiert.

Die Aufteilung wird exemplarisch in Abbildung 4-9 anhand der resultierenden F_x Knotenkräfte für den Lastfall 1 dargestellt. Innerhalb des Optimierungsalgorithmus werden für jeden Bereich die absoluten Knotenreaktionskräfte (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z) summiert und als mindestens zu erreichender Wert für diesen Lastfall gespeichert. Da das aufgebaute FE-Modell der Sandwichbauweise äquivalent zum Referenzmodell Knoten in der Lasteinleitungsregion besitzt, kann die Einteilung in die 15 Bereiche ebenfalls für die berechneten Knotenkräfte des Sandwichdaches genutzt werden. Entscheidend für die Optimierung ist, dass in keinem der 15 Bereiche die berechnete Steifigkeit geringer als die geforderte ist.

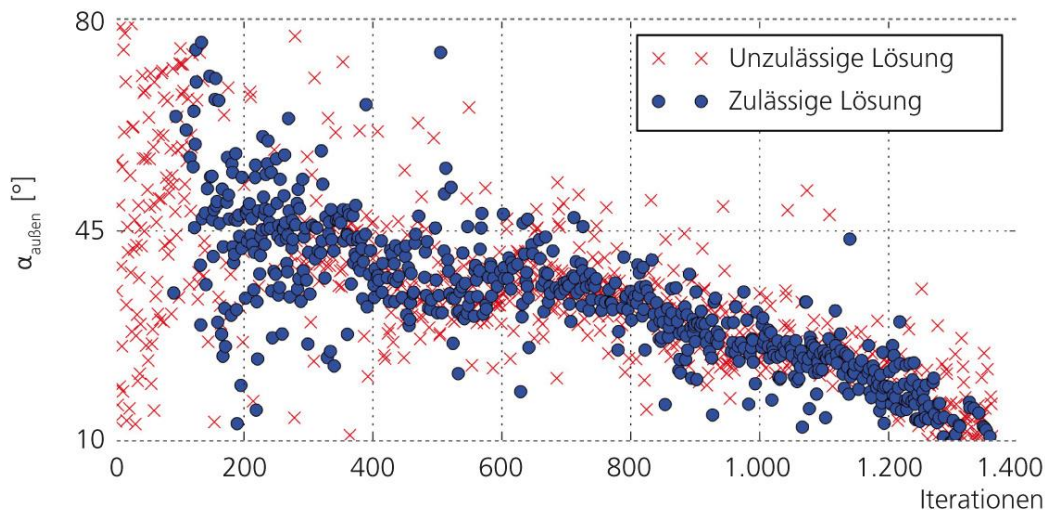


4-9 Position der Abschnitte für eine Summierung der Reaktionskräfte (blau gestrichelt)

4.10. Resultate der Optimierungsrechnung

4.10.1. Resultate: Details Dachprofil

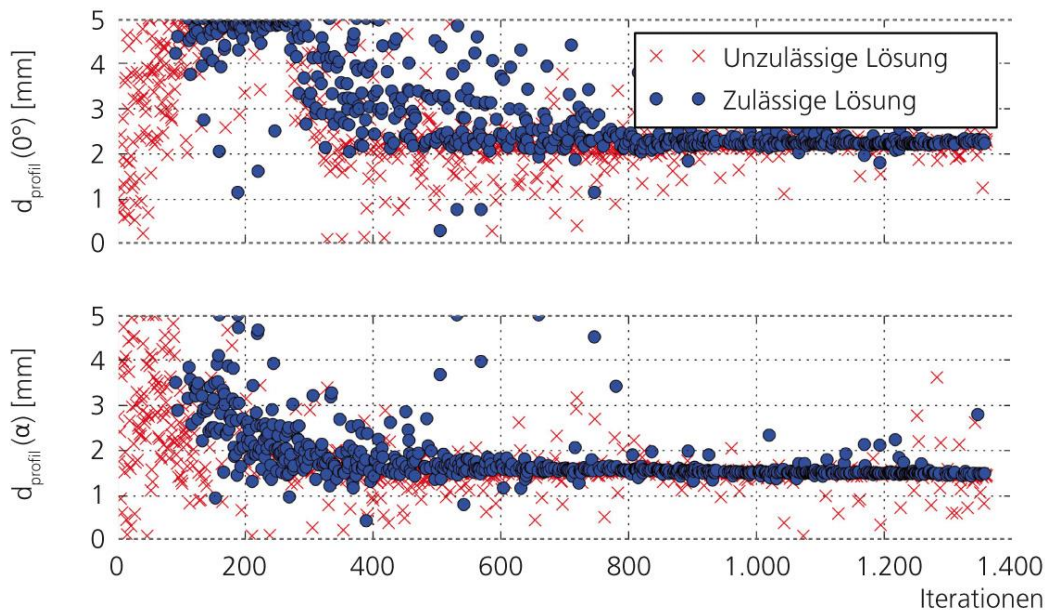
Äußere und innere Decklage



4-10 Verlauf des Laminatwinkels α_{aussen}

Innerhalb der Optimierung nimmt die Gesamtdicke der äußeren Sandwich-Decklage rasch ab. Lediglich der zu optimierende Winkel des Laminates konvergiert in kleinen Schritten auf sein Optimum von 10° . Abbildung 4-10 stellt den Optimierungsverlauf dieses Parameters exemplarisch für die äußere Decklage dar. Die insgesamt geringe Dicke der äußeren Deckschicht macht deutlich, dass ihr Anteil an der Gesamtsteifigkeit gering ist. Ebenso wie die äußere Decklage tendiert auch die innere Lage zu einer minimalen Dicke.

4.10.2. Resultate: Details Fußprofil



4-11 Optimierungsergebnisse Fußprofil

Abbildung 4-11 zeigt deutlich den Einfluss der Fußprofile. Sichtbar ist, dass die Dicke der 0° Lage einen immensen Einfluss auf die Optimierung hat. Die Dicke der winkelvariablen Lagen konvergiert zu ca. 1,5 mm. Der Winkel dieser Lage hat einen deutlichen Einfluss auf die Steifigkeit und wird daher vom Optimierungsalgorithmus nach wenigen Iterationen komplett in Dachlängsachse (10°) orientiert. Somit bestehen die Fußprofile der Sandwichbauweise nahezu komplett aus unidirektionalem CFK.

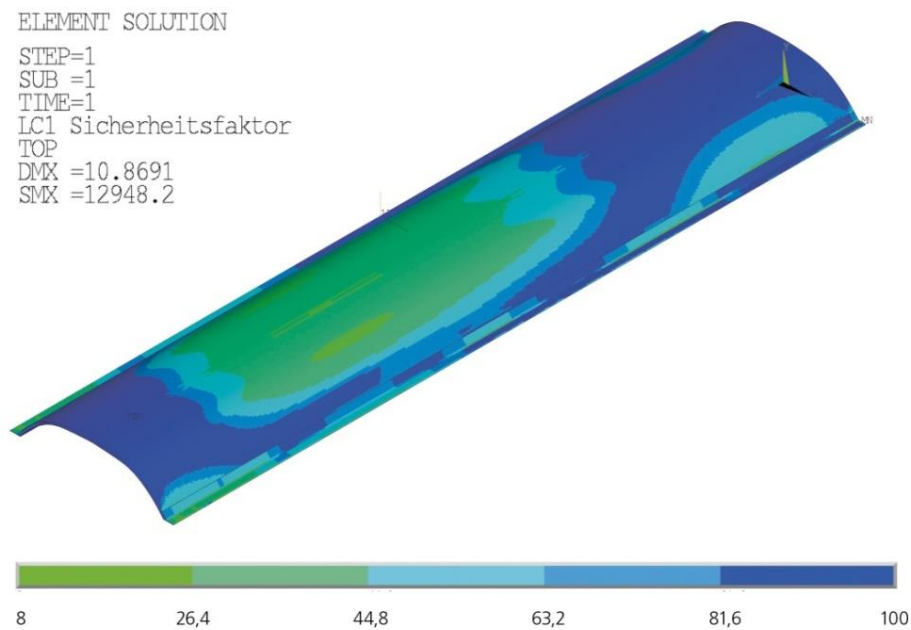
4.10.3. Resultate: Nebenbedingungen

Steifigkeiten

Innerhalb der betrachteten Lastfälle kann geschlussfolgert werden, dass die Steifigkeiten der Stahlsparanten in z-Richtung die treibenden Nebenbedingungen sind. Innerhalb der Stahldifferenzialbauweise können die Lasten durch die direkte Verbindung der einzelnen Abschnitte effizient geleitet werden. Die untersuchte Sandwichbauweise muss im Unterschied dazu diese Lasten durch die Fußprofile einleiten. Dies geschieht jedoch quer zur Laminatenebene und somit nicht optimal. Jedoch bedingt die Bauraumbegrenzung durch das Hochspannungskabel eine derartige Geometrie. Innerhalb der Optimierung findet der Algorithmus trotzdem eine leichte und vergleichbar steife Gesamtkonstruktion aus FKV.

Festigkeiten

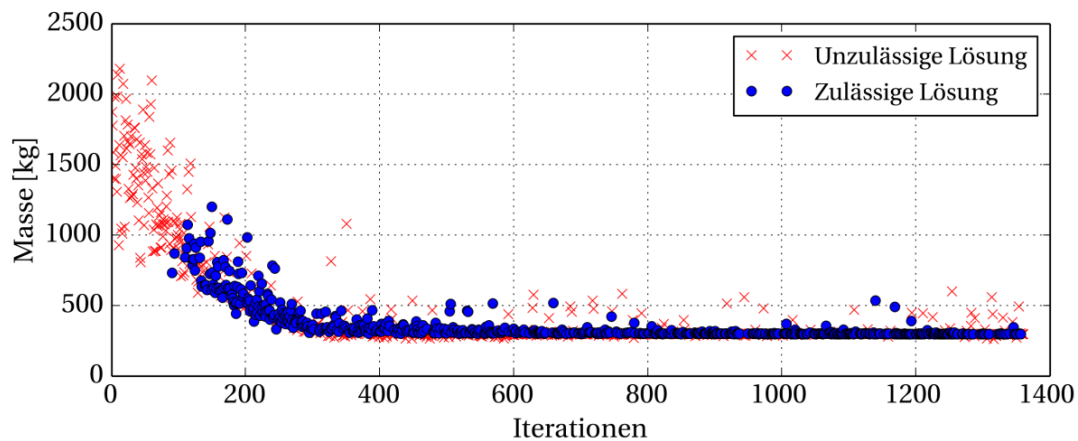
Innerhalb der gesamten Optimierung hat sich das Festigkeitsverhalten der FKV nicht als dimensionierend erwiesen. Dies ist jedoch materialabhängig und muss bei einer möglichen Auslegung mit verändertem Material stets neu geprüft werden. Abbildung 4-12 zeigt exemplarisch die berechneten Sicherheitsfaktoren für das optimierte Bauteil. Die berechneten Sicherheitsfaktoren der Elemente sind größer als 8. Die Darstellung der Sicherheitsfaktoren wurde auf Werte bis 100 begrenzt, um eine zielführende Visualisierung zu gewährleisten.



4-12 Sicherheitsfaktor für Lastfall 1

4.10.4. Gesamtresultat: Bauteilgewicht aus Optimierung

Der Lösungsverlauf innerhalb der Optimierung ist in 4-13 dargestellt. Die Masse des betrachteten Bauteils aus Schaumkern und Fasermaterial beträgt ca. 300 kg. Nicht berücksichtigt sind hierbei technologische Details wie Impact- und Brandschutz, EMV und Oberflächenfinish. Auf diese und die genauen Lösungsdetails wie Bauteilkontur, Faserausrichtung etc. wird im nächsten Schritt eingegangen.

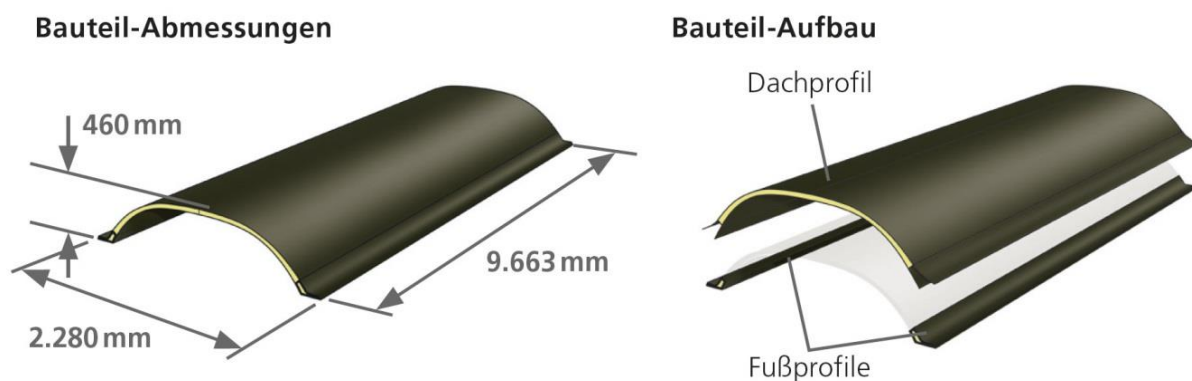


4-13 Entwicklung der Gesamtmasse während der Optimierung

5. Ergebnisse

Wie bereits erläutert kann eine reine FE-Optimierung unter den gegebenen Randbedingungen nicht alle erforderlichen Aspekte der technologischen Umsetzung berücksichtigen. Die nachfolgend zusammengestellten Ergebnisse basieren daher nicht ausschließlich auf den Resultaten der FE-Optimierung, sondern berücksichtigen zusätzlich die vorab erfolgten Überlegungen hinsichtlich Impact-Schutz, elektrischer Leitfähigkeit/EMV, Flammenschutz und Oberflächenfinish.

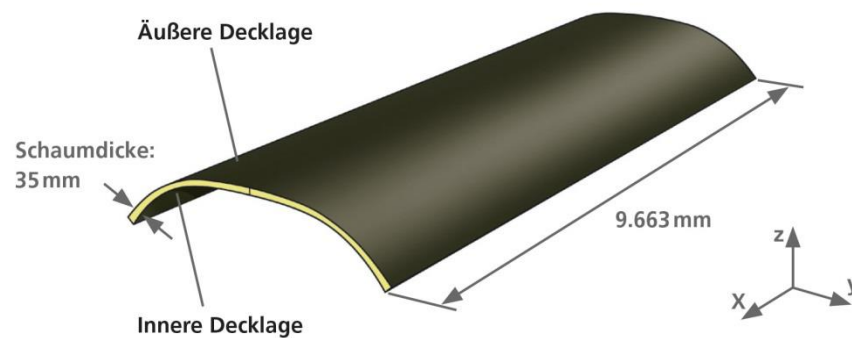
Abbildung 5-1 zeigt zusammenfassend den Bauteilaufbau des hier konzipierten FKV-Dachsegments. Dieses ist das Ergebnis aus den vorgegebenen Bauteilabmessungen sowie den vorangegangenen Überlegungen und Berechnungen. Das Dachsegment besteht aus zwei Fußprofilen und einem Dachprofil in Sandwichbauweise, welche nachfolgend im Detail vorgestellt werden und die Grundlage für die Gewichtsermittlung bilden.



5-1 Ergebnis: Bauweise Dachsegment

5.1. Ergebnis: Details Dachprofil

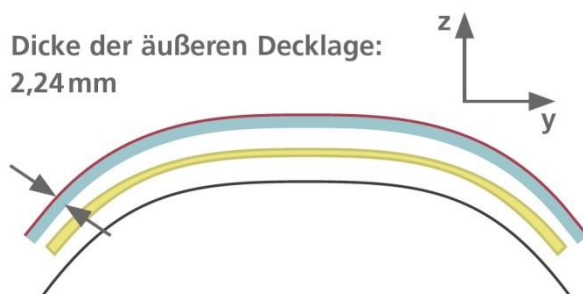
Das Dachprofil besteht aus äußerer und innerer CFK-Decklage sowie dem dazwischen liegenden strukturellen Schaumkern, siehe Abbildung 5-2.



5-2 Ergebnis: Details Dachprofil

5.2. Ergebnis: Äußere Decklage

Der Aufbau der äußeren Decklage ist im Folgenden im Detail dargestellt, siehe Abbildung 5-3 und Tabelle 5-1.



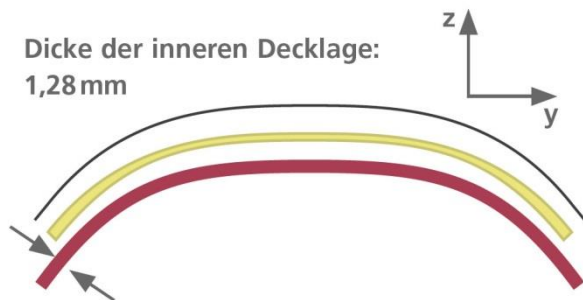
5-3 Ergebnis: Details äußere Decklage Dachprofil

Lage	Dicke	Orientierung	Anzahl
1	0,48 mm	0°/90°	1
3	0,16 mm	90°	2
4	0,16 mm	0°	2
5	0,16 mm	-10°	2
6	0,16 mm	10°	2
Summe	2,24 mm		

5-1 Äußere Decklage: Materialstärke und Faserausrichtung

5.3. Ergebnis: Innere Decklage

Der Aufbau der inneren Decklage ist im Folgenden im Detail dargestellt, siehe Abbildung 5-4 und Tabelle 5-2.



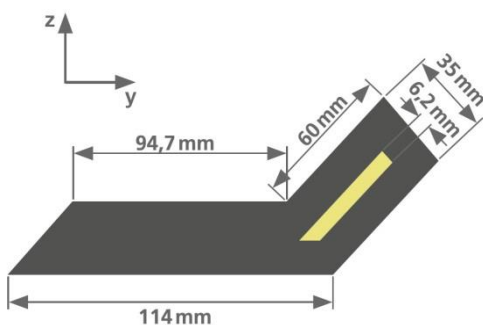
5-4 Ergebnis: Details innere Decklage Dachprofil

Lage	Dicke	Orientierung	Anzahl
1	0,16 mm	90°	2
2	0,16 mm	0°	2
3	0,16 mm	-10°	2
4	0,16 mm	10°	2
Summe	1,28 mm		

5-2 Innere Decklage: Materialstärke und Faserausrichtung

5.4. Ergebnis: Details Fußprofil

Abbildung 5-5 und Tabelle 5-3 zeigen die Ergebnisse der vorangegangenen Gestaltung des Fußprofils: Geometrie, Wanddicken und Lagenausrichtung.



5-5 Ergebnis: Details Fußprofil

Die erforderliche Wanddicke im Fußprofil beträgt 14,4 mm; die Wanddicke im Flanschbereich 28,8 mm sowie 35 mm zum Anschluss an das Dachprofil. In diesem Bereich wird daher ein Schaumkern von 6,2 mm Höhe eingesetzt.

Lage	Dicke	Orientierung	Anzahl
1	0,16 mm	0°	2
2	0,56 mm	90°	13
3	0,56 mm	-90°	12
4	0,16 mm	10°	2
Summe	14,4 mm		

5-3 Fußprofil: Materialstärke und Faserausrichtung

5.5. Gesamtergebnis: Bauteilgewicht

Mit den Ergebnissen aus der Bauteilgestaltung und der Optimierung lässt sich am Ende das Gesamtgewicht der Dachstruktur ermitteln. Dazu werden die Gewichte der Schaumkerne aus dem Dachprofil und aus den beiden Fußprofilen sowie die Gewichte der Lamine des Dachprofils (jeweils äußere und innere Decklage) und der beiden Fußprofile aufsummiert.

Um die schienenfahrzeugspezifischen Randbedingungen zu erfüllen, sind zusätzliche Maßnahmen und Komponenten erforderlich. Es handelt sich dabei um:

- Kupfer-Mesh zur Gewährleistung der elektrischen Leitfähigkeit (EMV) und als Sicherheitsmaßnahme bei Fahrdrahtabriss,
- Glasgewebe als Impactschutz,
- Flammenschutz,
- Oberflächenfinish (Gelcoat/Lackierung).

Die sich daraus ergebenden zusätzlichen Gewichte werden ebenfalls addiert. Das Gesamtgewicht des Bauteils unter Berücksichtigung aller notwendigen Details beträgt 884 kg, siehe Tabelle 5-4.

Komponente	Material	Masse*
Schaumkern Dachprofil	Divinycell P60	118 kg
Schaumkern Fußprofile	Divinycell P60	1 kg
Laminat Dachprofil (außen)	GF+CFK-Laminat	156 kg
Laminat Dachprofil (innen)	CFK-Laminat	80 kg
Laminat Fußprofile	CFK-Laminat	368 kg
EMV/Leitfähigkeit	Cu-Mesh	8 kg
Grundierung/Flammschutz		72 kg
Oberflächenfinish		86 kg
Gesamtmasse		884 kg

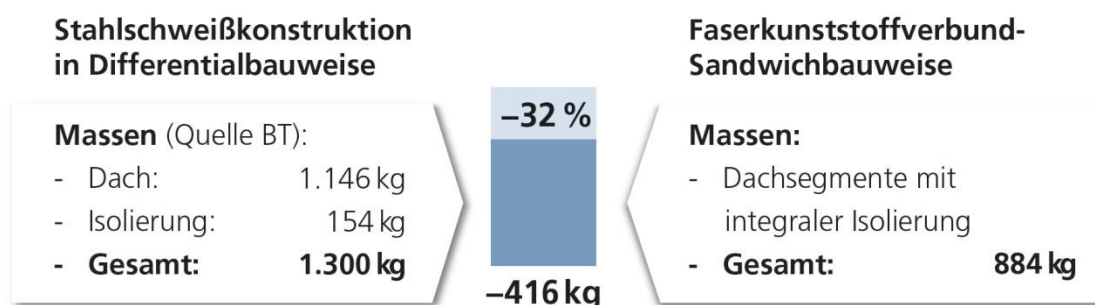
* = Gewichtsangaben auf ganze Zahlen aufgerundet

5-4 Komponenten- und Gesamtmasse

5.6. Diskussion der Ergebnisse

5.6.1. Vergleich der Gewichte von Metall- und FKV-Bauweise

Im Vergleich zur Metallbauweise können durch die hier entwickelte FKV-Bauweise 416 kg entsprechend 32 % des Gesamtgewichts eingespart werden, siehe Abbildung 5-6.

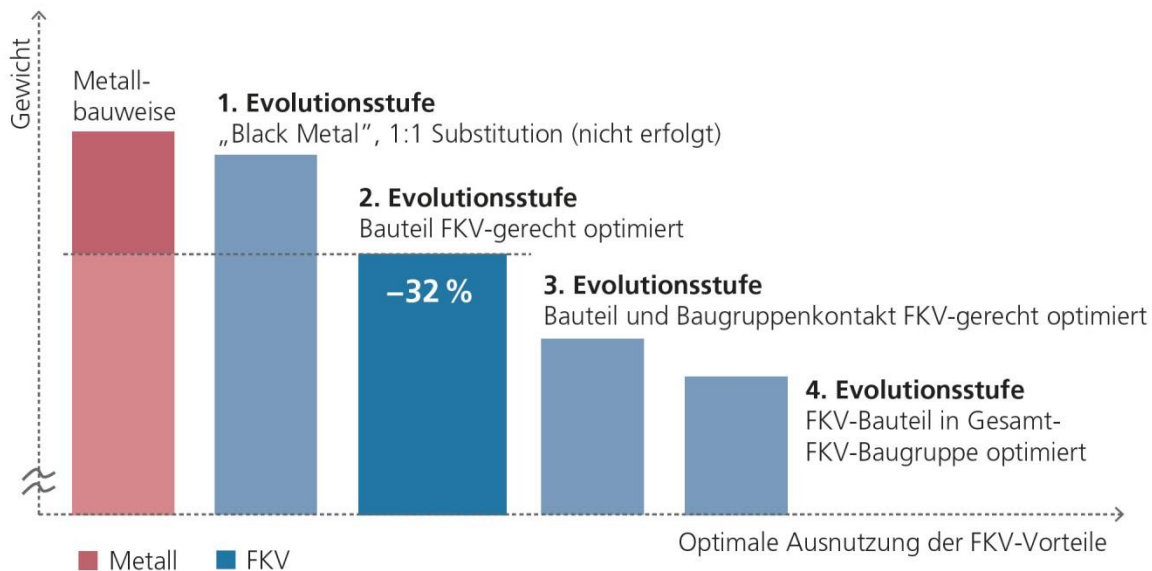


5-6 Massenvergleich Metall-/FKV-Bauweise – Einordnung der erreichten Gewichtseinsparung

5.6.2. Einordnung und Perspektive des erschlossenen Leichtbau-Potentials

Das mögliche Potenzial für Gewichtseinsparungen durch FKV ist abhängig von dem gewählten Werkstoffmigrationsansatz. Die Größenordnung der im Rahmen dieser Studie erreichten Gewichtseinsparung von 32% bezogen auf das Gewicht der Referenzstruktur entspricht dem Durchschnitt der bei einer Substitution des Werkstoffs Stahl und gleichzeitiger Anpassung der Bauweise erreichbaren Gewichtseinsparung.

Um das Ergebnis in einen direkten Bezug zu anderen Werkstoffmigrationsansätzen hin zu FKV setzen zu können, lassen sich diese Ansätze in so genannte Evolutionsstufen einteilen, siehe Abbildung 5-7.



5-7 Gewichtseinsparungspotenzial der Evolutionsstufen

Der im Rahmen dieser Studie im Detail umgesetzte und untersuchte Ansatz entspricht dabei der 2. Evolutionsstufe.

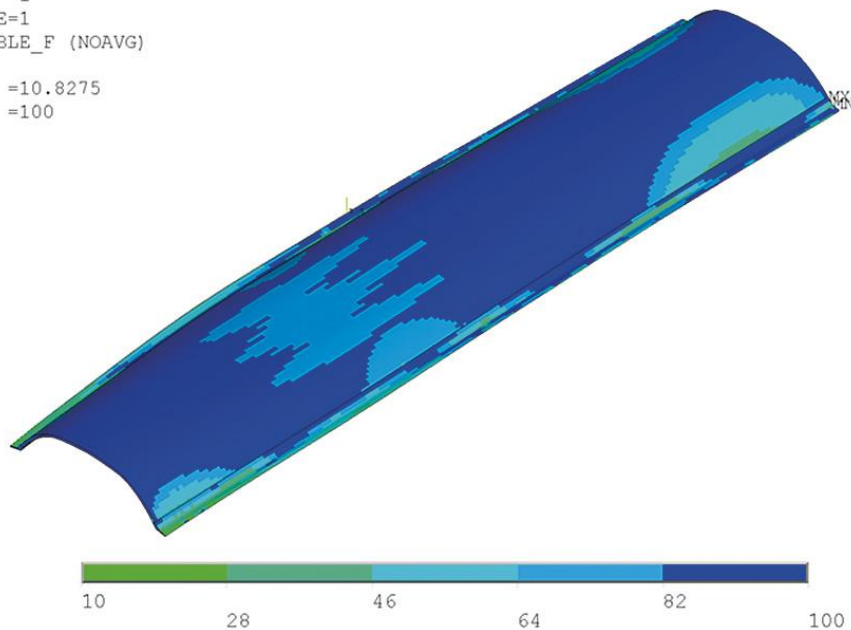
Die reine Materialsubstitution von Stahl durch CFK („Black Metal“, 1. Evolutionsstufe) ermöglicht in der Regel nur eine geringe Gewichtseinsparung.

FKV-optimale Bauweisen hingegen bieten Potenziale für weitere Gewichtsreduktionen. Bezogen auf die konkrete Dachstruktur besteht der nächste Schritt darin, die Steifigkeitssprünge im Übergangsbereich von der differenziellen Metallbauweise zur FKV-Sandwichbauweise durch eine optimierte Gestaltung auf Seiten der Metallbauweise zu vermindern (3. Evolutionsstufe). Der folgende und vielversprechendste Schritt, um die FKV-Leichtbaupotentiale vollständig auszuschöpfen, ist der Verzicht auf einen Übergangsbereich durch eine Umsetzung der gesamten Baugruppe in FKV-Bauweise (4. Evolutionsstufe).

Der Grund, warum die 3. und 4. Evolutionsstufen in diesem Fall noch ein besonders großes Gewichtseinsparpotenzial erwarten lassen, kann aus der in Abbildung 5-8 dargestellten vorhandenen „Sicherheit gegen Versagen“ abgeleitet werden: Der Sicherheitsfaktor gegen Versagen liegt bei erfüllter Forderung nach gleicher Steifigkeit (in dem exemplarisch dargestellten Lastfall) zwischen 10 und 100, was eine nur sehr geringe Ausnutzung des Festigkeitspotenzials des Materials bedeutet.

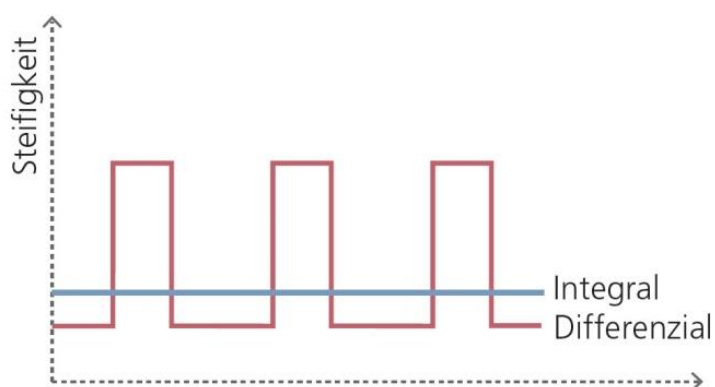
ELEMENT SOLUTION

STEP=1
SUB =1
TIME=1
ETABLE_F (NOAVG)
TOP
DMX =10.8275
SMX =100



5-8 Der Sicherheitsfaktor gegen Versagen beträgt 10 – 100

Der Beweggrund für diese steifigkeitsdominierte Auslegung ist die Forderung des gegebenen Last-Verformungsmodells, welches nicht nur global eine hohe Bauteilsteifigkeit erfordert, sondern modellherkunftsbedingt (aus Schnitt in Analyse von differentieller Metallbauweise) auch ganz explizit lokal im Bereich des Überganges von der metallischen differentiellen Bauweise zur integral / flächigen FVK-Bauweise, siehe Abbildung 5-9.



5-9 Prinzipdarstellung: Unterschiede lokale Steifigkeiten Differenzial- und Integralbauweise – auch bei global gleicher Bauteilsteifigkeit

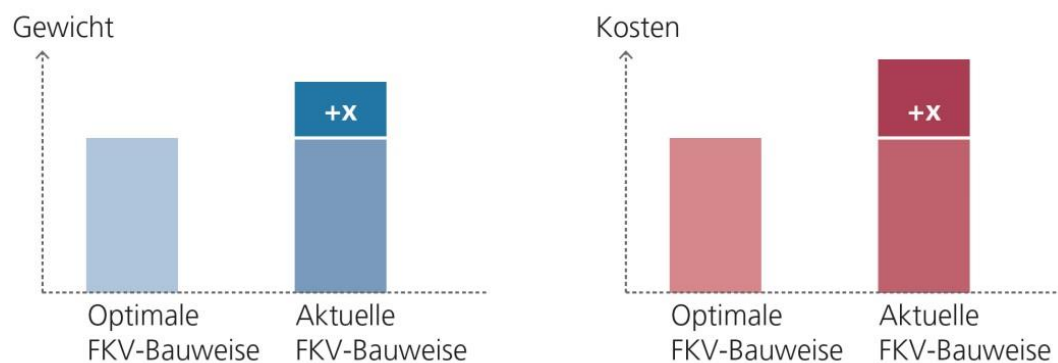
Die Konsequenz aus dieser hohen lokalen Steifigkeitsforderung ist ein hoher Materialeinsatzbedarf vor allem in den großen Wanddicken der Fußprofile, siehe Abbildung 5-10.



5-10 Aus der Forderung nach lokal hohen Steifigkeiten resultierende Wanddicken

Dieser erforderliche erhöhte Materialeinsatz führt zu:

- erhöhtem Bauteilgewicht,
- erhöhten Materialkosten aufgrund der höheren Materialmengen,
- erhöhten Fertigungskosten wegen des höheren Aufwands beim Ablegen der erhöhten Anzahl an einzelnen Faserlagen.



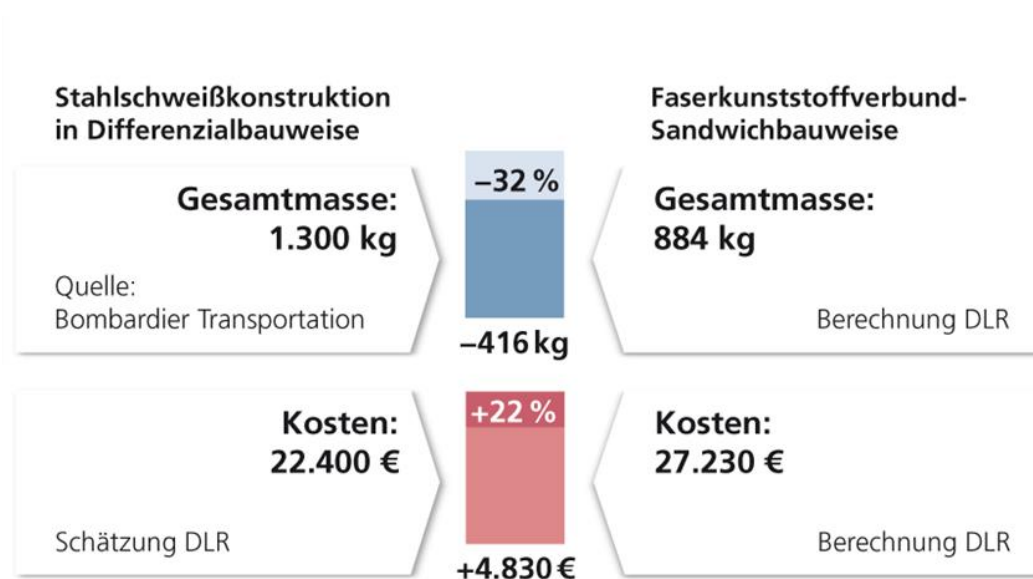
5-11 Effekte des erhöhten Materialeinsatzes

Diese Aufwände lassen sich durch die umfassenderen Ansätze der oben genannten 3. und 4. Bauteilevolutionsstufe weiter verkleinern, siehe Abbildung 5-11.

5.7. FKV-Kostenanalyse

Ausgangspunkt für die Kostenermittlung sind der Bauteilaufbau, die Anforderungen an die Werkstoffe, die berechneten Lagenaufbauten, Materialmengen und -kosten. Damit können die Materialgesamtkosten ermittelt werden. Mit der gewünschten Stückzahl und weiteren Randbedingungen lässt sich ein Fertigungskonzept für die Dachstruktur entwickeln und auf die Details der Teilprozesse herunterbrechen. Diese fließen in die Prozesskalkulationsmatrix ein.

Als Ergebnis stehen die Herstellkosten des Bauteils und die für den Aufbau der Fertigung erforderlichen Investitionsvolumina. Für die Gewichtseinsparung und die dafür erforderlichen Kosten ergibt sich folgendes Bild, siehe Abbildung 5-12 (Nickel, 2016).



5-12 Leichtbaupotenziale und Kostenanalyse

Das Gewicht der tonnenförmigen ICx-Mittelwagen-Dachsegmente kann durch eine CFK-Sandwichbauweise bei moderaten Mehrkosten signifikant reduziert werden:

- 32% Gewichtseinsparung durch CFK-Sandwich- gegenüber Stahlbauweise
- 12 € Mehrkosten pro eingespartem Kilogramm Masse

Wie eingangs in Kapitel 2.1 in Abbildung 2-1 dargestellt, können abhängig von Fahrzeugtyp sowie Einsatz- und Streckenprofil über einen Zeitraum von 30 Jahren Energiekosten in Höhe von 11 bis 66 Euro pro Kilogramm Massereduktion eingespart werden. Damit liegen die Mehrkosten in einem mehr als akzeptablen Rahmen für Schienenfahrzeuge und zeigen, dass unter den Randbedingungen der Projektstudie (Nickel, 2016) FKV-Strukturbauteile einen relevanten Business Case darstellen und weiter untersucht und -entwickelt werden sollten.

6. Verwertungsperspektive für das Projekt faWaSiS

Mit dem Verbundprojekt „faWaSiS“ haben die Partner Voith Turbo GmbH & Co. KG, Saertex GmbH & Co. KG, Forster System – Montage – Technik GmbH, DLR e. V., EAST-4D Carbon Technology GmbH und INVENT GmbH ein Projekt initiiert, das Einsatzmöglichkeiten von Faserkunststoffverbunden in Schienenfahrzeugen weiter untersuchen soll.

Im Weiteren beschäftigt sich das Forschungsprojekt mit der umfassenden Leichtbauoptimierung von hochbelasteten faserverbundintensiven Strukturen von Schienenfahrzeugen. Dies umfasst einen systematischen Ansatz, der die Konzeption, Konstruktion, Auslegung und Optimierung unter Einbeziehung aller Leichtbaustrategien beinhaltet. Erforderliche Schlüsseltechnologien für den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen in Tragstrukturen sind Health-Monitoring-Systeme sowie ein geeigneter Brandschutz. Der systematische Ansatz und die Etablierung der Schlüsseltechnologien werden schrittweise anhand einer Bugklappe angewandt. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen erfolgt die Erweiterung des systematischen Ansatzes auf eine Dachstruktur.

Die entwickelte leichtbauoptimierte Bugklappe und Dachstruktur werden als Demonstrator in faserverbundintensiver Bauweise mit Health-Monitoring-System gefertigt. Durch eine Validierung der Komponenten auf dem Prüfstand bzw. im Fahrzeug wird das jeweilige Potential (strukturell, ökonomisch, LCC, Masseeinsparung, Brandschutz) aufgezeigt. Für das Dach wird eine Massereduktion von 25 % gegenüber der Referenzstruktur angestrebt (faWaSiS 2017).

Bei der Entwicklung von Konzepten (AP2200 Konzeption Baugruppe "Dachstruktur") und Konstruktionslösungen (AP3200 Konstruktion „Dachstruktur“) für die Dachstruktur dienen die gewonnenen Erfahrungen aus der Leichtbaustudie als Referenz und leisten wichtige Beiträge für den Entwicklungsfortschritt.

Die Studie (Nickel, 2016) zeigt, dass Faserkunststoffverbundleichtbau bei Schienenfahrzeugen wirtschaftliche und ökologische Vorteile bietet, wenn die werkstoffspezifischen Eigenschaften berücksichtigt sowie faserverbundgerechte Bauweisen und Fertigungsverfahren angewendet werden. Dazu hat die Studie an einer aktuellen metallischen Wagenkastenstruktur – einem Mittelwagen des neuen ICx – ein für die Faserkunststoffverbundbauweise geeignetes Bauteil – das Dach – identifiziert und daran explizite Gewichtseinsparpotenziale und Kosten analysiert.

Dabei sind die Voraussetzungen und Randbedingungen nicht ideal. Um die optimalen Potenziale ermitteln zu können, muss stets die Gesamtstruktur betrachtet und ihre Konstruktion faserverbundgerecht gestaltet werden. Dies war im Rahmen der Studie so nicht möglich. Trotz des begrenzten Ansatzes, das heißt nur der Substitution von Teilen, ließ sich zeigen, dass eine signifikante Gewichtseinsparung durch den Wechsel von einer Metall-Differenzial- zu einer FKV-

gerechten Integral-Bauweise möglich ist, die beispielsweise die Isolierung als strukturellen Schaumkern integriert und darüber hinaus weitere Optimierungsmöglichkeiten durch Funktionsintegration bietet. Die festgestellte Kostensteigerung für die FKV-Bauweise liegt an der unteren Grenze der von verschiedenen Quellen genannten tolerablen Werte. Die Kombination aus umfassender Recherche und detaillierter Analyse der wesentlichen Leichtbaupotenziale und Kosten ist ein Alleinstellungsmerkmal der durchgeführten Studie.

Die Beratung und Bewertung von Konzepten und Konstruktionslösungen für das Projekt faWaSiS erfolgten im Rahmen von Telefonkonferenzen sowie Workshops und Projekttreffen bzw. -sitzungen. Neben der Kommunikation in großer Runde fand der Austausch vor allem auch bilateral mit dem Institut für Fahrzeugkonzepte, Abteilung FK-LHB, statt. Die Diskussionen beinhalteten von der Abteilung FK-LHB präsentierte Bauweisenkonzepte und Konstruktionsvorschläge sowie dementsprechende Empfehlungen von FA-FLB. Ansätze und Vorschläge zur Optimierung wurden mit Beispielen aus der Leichtbaustudie ergänzt und untermauert. Die Beratung erstreckte sich sowohl auf Konzepte und Bauweisen als auch auf Empfehlungen hinsichtlich des Berechnungsmodells.

Empfehlungen

Weitere Gewichtseinsparungen sind möglich, wenn die Randbedingungen so gesetzt sind, dass der gesamte Wagenkasten betrachtet und im Hinblick auf eine faserverbundgerechte Bauweise optimiert werden kann. Dadurch lassen sich beispielsweise die im vorliegenden Fall notwendigen gewichts- und kostentreibenden Schnittstellen zwischen integrelem FKV-Dach und Wagenkastenstruktur in Stahl-Differenzialbauweise signifikant verbessern. Die bei Faserkunststoffverbunden vorteilhafte Möglichkeit zur Integration weiterer Funktionen verspricht zusätzliche Gewichtseinsparungen. Weitergehende Betrachtungen sollten darüber hinaus die weit verbreiteten Aluminium-Strangpressbauweisen in Vergleich und Bewertung einbeziehen um das Bild weiter zu vervollständigen. Auf der Faserkunststoffverbundseite gewinnen thermoplastische Werkstoffe an Bedeutung und bieten prinzipielle Kosten-, Fertigungs- und Recyclingvorteile. Brandschutzgesichtspunkten ist hierbei jedoch besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Mit weitergehenden Bauweisen- und Werkstoffvergleichen in dem hier vorgenommenen hohen Detaillierungsgrad lässt sich ein umfassenderes Bild erzeugen sowie im Gesamtsystem besonders lohnende Bauteile und Komponenten hinsichtlich Gewichts- und Kostenpotenzialen identifizieren und einordnen.

Unter den schienenfahrzeugspezifischen Randbedingungen stellen die verschärften europäischen Brandschutzanforderungen, das akustische Verhalten und der damit verbundene Geräuschkomfort von Faserkunststoffverbunden, elektrische und elektromagnetische Verträglichkeit, Nachweis- und Berechnungsverfahren, Reparaturkonzepte, Prüf- und Wartungsverfahren und -zyklen etc. besondere Herausforderungen dar. Lösungskonzepte

existieren oder können aufbauend auf Erfahrungen aus anderen Branchen, z. B. von der Luftfahrt, einem Vorreiter in Sachen FKV-Sicherheit abgeleitet und (weiter-)entwickelt werden.

Der Bedarf ist erkannt. Wesentliche Grundlagen für europaweit einheitliche und verbindliche Regularien wurden im Rahmen des im September 2013 gestarteten Projekts „REFRESCO“ (Towards a REgulatory FRamework for the use of Structural new materials in railway passenger and freight CarbOdyshells) bis Anfang 2016 erarbeitet. Projektziele sind unter anderem die Empfehlung neuer Materialien für Schienenfahrzeuge sowie Identifikation von Lücken in bestehenden Rahmenbedingungen zur Auslegung von Schienenfahrzeugen bezüglich Wartungsfreundlichkeit, struktureller Fragestellungen, Brandschutz und Unfallverhalten. Dies sind wichtige Voraussetzungen für die Prüfbarkeit und Zulassung von FKV-Werkstoffen unter Bahngesichtspunkten. Zuverlässige und einheitliche Auslegungsverfahren und -kriterien müssen erarbeitet und definiert und in Normen und Zulassungsvorschriften gefasst werden, um FKV-Werkstoffe im Schienenfahrzeugsektor verstärkt einsetzen und ihre Vorteile nutzen zu können.

Von großer Bedeutung ist dabei, dass die gestellten Anforderungen die Gewichtsvorteile von Faserkunststoffverbundwerkstoffen nicht zu stark reduzieren. Hier ist ein intelligenter Einsatz von FKV-Werkstoffen und Bauweisen gefragt.

Die Fertigungskosten liegen bei der Sandwichbauweise für das Dachbauteil und die ausgewählten Fertigungsverfahren bereits auf akzeptablem Niveau. Insgesamt sind weitere signifikante Kostensenkungen zu erwarten, da sich die Materialpreise durch weitere Verbreitung in anderen Branchen und bessere Verfügbarkeit der Werkstoffe verringern werden. Weitergehende Entwicklungs- und Kostenprognosen mit Zeithorizonten von 5 - 10 bzw. 10 - 20 Jahren können helfen, diese Erwartungen zu quantifizieren und strategische Planungen sinnvoll unterstützen.

Wesentliche Erkenntnisse und Empfehlungen hinsichtlich Konzept und Bauweise sind im Folgenden zusammenfassend in den wichtigsten Punkten dargestellt:

- Bereiche mit vielen Lasteinleitungen (mehrachsige Spannungszustände), zum Beispiel ebene Dachbereiche mit Anbauteilen, Klimaanlageinstallation etc., sind in Metallbauweise oftmals günstiger.
- Tonnenförmige ungestörte Dachabschnitte lassen sich gut in FKV-Sandwich-Bauweise ausführen.
- Bei der Verwendung von FKV sind einfache Geometrien für einfache Werkzeuge und Fertigung zu bevorzugen.
- Bei der Entwicklung von Konzepten und Bauweisen sind die Randbedingungen der unterschiedlichen Fertigungsverfahren, zum Beispiel Harzinfusion oder Faserwickeltechnik zu berücksichtigen.

- Ein möglichst gleicher Lagenaufbau über weite Bereiche, soweit technisch vertretbar, bedeutet reduzierte Kosten für die FKV-Struktur.
- Mit Funktionsintegration (Wärmeisolierung, elektrische Leitfähigkeit, Impactschutz, etc.) lassen sich Gewicht und Kosten weiter optimieren.

Hinweise zu Lasteinleitungen und Verbindungstechnik

- An der Schnittstelle zwischen Faserkunststoffverbund-Dach und metallischem Wagenkasten in Differenzialbauweise gilt es Punktlasten zu vermeiden. Stahlspanten induzieren hohe Punktlasten an den Schnittstellen und sind als Herausforderung für FKV-Strukturen zu sehen. Mittels eines im Übergangsbereich angeordneten metallischen Längsträgers lassen sich Kräfte „verschmieren“.
- Das Dach lässt sich mittels Verklebung und ggf. zusätzlichen Bolzen an die Waggonstruktur anbinden.
- Zur Krafteinleitung mittels Bolzenverbindung und Vermeidung von Aufdickungen bzw. zur Verbesserung der Anschlußfestigkeit kann ein schichtweiser Aufbau von wechselweisen Titan- oder Stahlblecheinlagen und CFK-Lagen dienen.
 - Dies ist jedoch nur lokal zu empfehlen.
 - Eine Hybridisierung über die gesamte Länge ist eventuell möglich, aber teuer.
 - Bei der Materialpaarung FKV/Metall ist auf ähnliche Steifigkeiten achten: prinzipiell mögliche Kombinationen sind Stahl/CFK, Ti/CFK, Al/GFK.
 - Die Fertigung ist nur bzw. vorzugsweise mit Prepregs möglich, da eine Harzinfiltrierung schwierig ist.
- Anbindungspunkte mit Nadeln oder Pins sind teuer und aufwändig, jedoch im innenliegenden Bereich denkbar.
 - Grundsätzlich ist eine gute Oberflächenqualität erreichbar.
 - Bolzenverbindungen sind deutlich günstiger und einfacher als Klebeverbindungen, wenn die Oberflächenbeschaffenheit (Störungen) zweitrangig ist.
- Im Klimaanlagenausschnitt treten hohe Punktlasten aufgrund von lokalen Krafteinleitungen auf.
 - Daher empfiehlt es sich, ggf. den Bereich des Klimaanlagenausschnitt in Stahldifferentialbauweise auszuführen.
 - FKV/CFK kann sinnvoll für die restliche Dachstruktur eingesetzt werden.
- Ein gezielter Einsatz der Werkstoffe Stahl und CFK ist sehr zu empfehlen.
- Ein bereichsweiser Einsatz von CFK ist zu prüfen, zum Beispiel können Zug- oder Druckstäbe durch UD CFK Stäbe ersetzt werden.

Empfehlungen zur Berücksichtigung von Randbedingungen

- Im Rahmen der Leichtbaustudie hat die Berechnung Impactfälle nicht einbezogen; grundsätzlich muss allerdings mit einem Compression After Impact Wert gerechnet werden. Dieser ist vom Laminat abhängig und in einer möglichen Optimierung zu berücksichtigen.
- Unter möglichen Impactszenarien sollte „Tool drop“ als relevanter Impactfall betrachtet werden.
- Ein Glasfasergewebe in der äußeren Deckschicht dient zur Reduzierung der Auswirkungen und der einfacheren Identifikation von eventuell auftretenden Impactfällen.
- Zur Gewährleistung der elektrischen Leitfähigkeit, um bei Fahrdrahtabriss einen Kurzschluss und damit Stromabschaltung zu ermöglichen, ist im FKV-Dach ein sogenanntes Kupfermesh ähnlich wie bei Flugzeugen (dort als Blitzschutz) eingebracht. Die Leichtbaustudie berücksichtigt das Kupfermesh als Masse und als nicht veränderliche Lage in der Dachstruktur. Ein detailliertes Konzept für den elektrischen Anschluss an die Reststruktur wurde nicht betrachtet. Für die Kontaktierung strukturintegrierter Leiterbahnen sind jedoch Konzepte und Bauweisen vorhanden und können genutzt werden.

Hinweise für die Optimierung

Bei Lastüberhöhungen an Versteifungselementen und an Spanten der Metallstruktur gilt es, steife Trägerstrukturen zu realisieren, um die Lastspitzen zu mitigieren.

- Bezüglich der Festigkeitswerte der Lamine, insbesondere an Ausschnitten, gilt: Bestimmen der Spannungsspitzen und händisches, dann automatisiertes Evaluieren auf Stichhaltigkeit.
- Inserts im Laminat: ein sehr wichtiger Punkt für das reale Dach, aber in der Optimierung nicht explizit berücksichtigt, stattdessen Verwendung eines Pauschalwerts.
- Festigkeiten der Decklagen/Kernverbindung berücksichtigen und pauschal nach einer konstruktiven Lösung suchen.
- Ziel ist eine Automatisierung der Optimierung, weg von manuellem „Educated Guess“.

7. Zusammenfassung

Der hier vorliegende Bericht hat Leichtbaumaßnahmen mit Faserkunststoffverbunden (FKV) für Schienenfahrzeuge unter den Aspekten Gewichtseinsparung und damit verbundener Kosten für das Projekt faWaSiS betrachtet. Untersuchungsgegenstand war die Dachstruktur eines ICx-Wagenkastens. Die aktuell produzierte differenzielle Stahl-Schweißkonstruktion wurde mit einer hier konzipierten und berechneten Faserkunststoffverbund-Sandwichstruktur verglichen. Der hier vorliegende Bericht stützt sich maßgeblich auf die 2016 publizierte Projektstudie „Einsatz von CFK-Leichtbau-Faserverbund-Technologien im Schienenfahrzeugbau“ (Nickel, 2016).

Die Entwicklung der FKV-Bauweise für die Dachstruktur (Kapitel 2) sowie eine Einführung in die numerische Optimierung (Kapitel 3) und der Prozess der Gewichtsoptimierung (Kapitel 4) wurden dargestellt und die Resultate (Kapitel 5) bewertet. Aus den Erfahrungen und Ergebnissen lassen sich am Ende Empfehlungen (Kapitel 6) für die Konzeption, Gestaltung und Optimierung zukünftiger FKV-Leichtbaustrukturen für Schienenfahrzeuge ableiten und können Input für weiterführende Projekte liefern.

Die Arbeiten haben gezeigt, dass Leichtbau mit Faserkunststoffverbunden bei Schienenfahrzeugen wirtschaftliche und ökologische Vorteile bietet, wenn die spezifischen Eigenschaften der Werkstoffe berücksichtigt sowie faserverbundgerechte Bauweisen und Fertigungsverfahren angewendet werden.

Der Bericht hat konkreten Input für das Projekt faWaSiS (*Signifikante Masseeinsparung durch strukturell tragende faserverbundintensive Wagenkastenstrukturen von Schienenfahrzeugen mit integriertem Schadensdiagnosesystem*) geliefert. Dieser beinhaltet die folgenden Punkte:

- Darstellung der Schritte bei der Entwicklung der FKV-Bauweise für das Dachsegment sowie der Berechnung und der numerischen Optimierung
- Darstellung der Rahmenbedingungen und Erkenntnisse aus obiger Studie
- Methodik für die Bewertung von Leichtbaumaßnahmen
- Input für die Konzeptbewertung von faserverbundintensiven Leichtbau-Dachstrukturen auf Basis der Projektstudie „Einsatz von CFK Leichtbau-Faserverbundtechnologien im Schienenfahrzeugbau“
- Empfehlungen für Gestaltung, Konstruktion und Bau von Leichtbaustrukturen in Schienenfahrzeugen am Beispiel eines Wagenkastendaches
- Beratung bei der Bewertung von Konstruktionslösungen

Abbildungsverzeichnis

2-1 Energiekostensparnis je eingespartem Kilogramm Masse über 30 Jahre (<i>Dittus, 2013</i>)	8
2-2 FKV in Schienenfahrzeugen und Beispiele für Fertigungsverfahren (<i>Nickel, 2016</i>).....	9
2-3 Wagenkasten eines ICx-Mittelwagens als Schweißkonstruktion in Stahl-Differenzialbauweise [BT Hennigsdorf].....	11
2-4 ICx-Mittelwagen-Dachbereiche	11
2-5 Für die Ermittlung des FKV-Leichtbaupotenzials ausgewählte Dachbereiche des ICx- Mittelwagens	12
2-6 Prinzipdarstellung Faserverbund-Sandwichbauweise	14
2-7 Aufbau und Randbedingungen	14
2-8 Variationsparameter: Leichtbaupotential abhängig von Laminatperformance und Sandwichkern.....	15
2-9 Gewählte Variante „High Performance“ mit hochsteifen, richtungsoptimierten CFK Decklaminaten und einem leichten Schaumkern großer Dicke und Druckfestigkeit.....	16
3-1 Strukturoptimierung (nach Eschenauer, 2006)	18
3-2 Jupyter Lab GUI und die bereitgestellten Dateien für die automatisierte Bearbeitung	20
3-3 Vergleichsspannungsverteilung der Finite Element Simulation für eine exemplarische Rechnung des Biegebalkenmodells.....	21
3-4 Beispielhaftes Ergebnis der Parameteruntersuchung, maximale Vergleichsspannung im Modell bezogen auf Breite und Höhe	22
3-5 Beispielhaftes Ergebnis der Parameteruntersuchung, maximale Deformation im Modell bezogen auf Breite und Höhe	23
4-1 Vereinfachte Darstellung der Lasteinleitungsregion	25
4-2 3D-Darstellung der Referenzknotenkoordinaten und der substituierten Bereiche	25
4-3 Lastfall Nr.1: Knotenkräfte	26
4-4 Lastfall Nr.1: Knotenverschiebungen	27
4-5 Werkstofffestlegung für die gewählte Variante „High Performance“	28
4-6 Querschnitt des modellierten FKV-Daches.....	29
4-7 Ablaufdiagramm der verwendeten Optimierungsumgebung	30
4-8 Optimierungsparameter für ein symmetrisches, ausgewogenes Laminat	32
4-9 Position der Abschnitte für eine Summierung der Reaktionskräfte (blau gestrichelt)	33
4-10 Verlauf des Laminatwinkels $\alpha_{\text{außen}}$	34
4-11 Optimierungsergebnisse Fußprofil	35
4-12 Sicherheitsfaktor für Lastfall 1	36
4-13 Entwicklung der Gesamtmasse während der Optimierung	37
5-1 Ergebnis: Bauweise Dachsegment	38
5-2 Ergebnis: Details Dachprofil	39
5-3 Ergebnis: Details äußere Decklage Dachprofil	39
5-4 Ergebnis: Details innere Decklage Dachprofil	40

5-5 Ergebnis: Details Fußprofil.....	40
5-6 Massenvergleich Metall-/FKV-Bauweise – Einordnung der erreichten Gewichtseinsparung...	42
5-7 Gewichtseinsparungspotenzial der Evolutionsstufen	43
5-8 Der Sicherheitsfaktor gegen Versagen beträgt 10 – 100.....	44
5-9 Prinzipdarstellung: Unterschiede lokale Steifigkeiten Differenzial- und Integralbauweise – auch bei global gleicher Bauteilsteifigkeit.....	44
5-10 Aus der Forderung nach lokal hohen Steifigkeiten resultierende Wanddicken	45
5-11 Effekte des erhöhten Materialeinsatzes	45
5-12 Leichtbaupotenziale und Kostenanalyse	46

Tabellenverzeichnis

4-1 Materialkennwerte der für die Berechnung gewählten Variante „High Performance“	28
4-2 Optimierungsparameter und die zulässigen Wertebereiche	31
5-1 Äußere Decklage: Materialstärke und Faserausrichtung.....	39
5-2 Innere Decklage: Materialstärke und Faserausrichtung	40
5-3 Fußprofil: Materialstärke und Faserausrichtung	41
5-4 Komponenten- und Gesamtmasse	42

Literaturverzeichnis

- DIN EN 12663-1:2010+A1:2014 (03 2015). Bahnanwendungen - Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen - Teil 1: Lokomotiven und Personenfahrzeuge (und alternatives Verfahren für Güterwagen). Berlin, Deutschland: Norm.
- DIN EN 15380-2:2006 (06 2006). Bahnanwendungen – Kennzeichnungssystematik für Schienenfahrzeuge – Teil 2: Produktgruppen. Berlin, Deutschland: Norm.
- Dittus, H.; Pagenkopf, J. (20. 03 2013). *Lightweight Design in Railway Vehicles - Energy and Cost Potential*. DLR Institut für Fahrzeugkonzepte. Frankfurt, Hessen, Deutschland: Vortrag beim DMG-Ausschuss Leichtbau.
- Eschenauer, H. A. (2006). Structural behaviour and optimal layout of light constructions. *Archive of Applied Mechanics* 75, 441–457. Duisburg, NRW, Germany: Journal
- faWaSiS (03. 02 2017). Signifikante Masseeinsparung durch strukturell tragende faserverbundintensive Wagenkastenstrukturen von Schienenfahrzeugen mit integriertem Schadensdiagnosesystem. *Verbundbeschreibung (vertraulich) zur Beantragung einer Förderung im BMWi-Förderprogramm „Leichtbaukonzepte für Straßen- und Schienenfahrzeuge“*. Heidenheim, Baden-Württemberg, Deutschland: Projektantrag
- Nickel, J.; Fischer, F.; Friedrich, M.; Hühne, C.; Köke, H.; König, J.; Kopp, G.; Wolff, J. (05 2016). Projektstudie. *Einsatz von CFK-Leichtbau-Faserverbund-Technologien im Schienenfahrzeugbau im Auftrag des CFK Valley e. V. DLR e.V., Institut für*

Faserverbundleichtbau und Adaptronik. Braunschweig, Niedersachsen, Deutschland:
 Buch. Verlag Meinders & Elstermann, Belm, ISBN 978-3-88926-700-9.

Abkürzungsverzeichnis

.

A

Al Aluminium
 Ansys (ANalysis SYStem) Finite-Elemente-Software der Firma ANSYS Inc., USA

B

BEM Boundary Element Method
 BMC Bulk Moulding Compound (spezielles Faser-Matrix-Halbzeug)
 BT Bombardier Transportation GmbH, Hennigsdorf (Schienenfahrzeughersteller)

C

CAD Computer Aided Design
 CFK Carbonfaser (oder Kohlenstofffaser) verstärkter Kunststoff
 Cu Kupfer

D

DMX maximale Durchbiegung im FEM-Plot

E

E Elastizitätsmodul [GPa]
 EMV Elektromagnetische Verträglichkeit
 ε Dehnung

F

faWaSiS Verbundprojekt: Signifikante Masseeinsparung durch strukturell tragende
faserverbundintensive Wagenkastenstrukturen von Schienenfahrzeugen mit integriertem
Schadensdiagnosesystem

FEM Finite Element Method
 FKV Faserkunststoffverbund(-werkstoff)
 FST Fire (oder Flame), Smoke, and Toxicity

G

G Schubmodul [GPa]
 GFK Glasfaser verstärkter Kunststoff
 GUI Graphic User Interface / Grafische Benutzeroberfläche

H

HM-Fasern Hochsteife (High Modulus) (Carbon-)Fasern
 HT-Fasern Hochfeste (High Tensity / High Tenacity) (Carbon-)Fasern

I

ICx ursprüngliche Typenbezeichnung für den späteren ICE 4 (Intercity Express 4)

L

LCA Life Cycle Analysis

N

NGT Next Generation Train (DLR Grundlagenforschungsprojekt)

ν Querkontraktionszahl [-]

R

RTM Resin Transfer Moulding (ein Harzinfusionsverfahren zur Bauteilherstellung)

S

SMC Sheet Moulding Compound (spezielles Faser-Matrix-Halbzeug für Pressverfahren)

SMX Maximale Vergleichsspannung im FEM-Plot

T

Ti Titan

Tool Drop Impact Scenario (Laminatbeanspruchung durch herabfallendes Werkzeug)

U

UD Unidirektional, d. h. Fasern in einer einzigen Richtung orientiert

W

WEA Windenergieanlage